

N° D'ORDRE :  
2455  
SÉRIE A N° 1589

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**Mme F. BAYARD-DUCLAUX**

---

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — RECHERCHES SUR LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE  
DES ROCHES.

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 14 Octobre 1935 devant la Commission d'examen.

MM. MAURAIN ..... *Président.*

MICHEL-LÉVY.....  
LABROUSTE..... } *Examineurs.*

---

PARIS

MASSON ET C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1935







Digitized by the Internet Archive  
in 2026

N<sup>o</sup> D'ORDRE :  
2455  
SÉRIE A N<sup>o</sup> 1589

---

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**Mme F. BAYARD-DUCLAUX**

---

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — RECHERCHES SUR LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE  
DES ROCHES.

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

**Soutenues le      Octobre 1935 devant la Commission d'examen.**

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| MM. MAURAIN ..... | <i>Président.</i>   |
| MICHEL-LÉVY ..... | } <i>Examineurs</i> |
| LABROUSTE .....   |                     |

---

**PARIS**  
**MASSON ET C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS**  
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE  
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—  
1935

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire..... M. MOLLIARD.  
Doyen..... C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe.

|                               |                                                                                                   |                                                                                 |                                                                   |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <i>Professeurs honoraires</i> | { H. LE CHATELIER.<br>H. LEBESGUE.<br>A. FERNBACH.<br>A. LEDUC.<br>Émile PICARD.<br>Rémy PERRIER. | LÉON BRILLOUIN.<br>GOURSAT.<br>WALLERANT.<br>GUILLET.<br>PÉCHARD.<br>FREUNDLER. | AUGER.<br>BLAISE.<br>DANGEARD.<br>JANET.<br>LESPIEAU.<br>MARCHIS. |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|

## PROFESSEURS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| G. BERTRAND..... T Chimie biologique.<br>M. CAULLERY..... T Zoologie (Évolution des êtres organisés).<br>G. URBAIN..... T Chimie générale.<br>Émile BOREL..... T Calcul des probabilités et Physique mathématique<br>Jean PERRIN..... T Chimie physique.<br>H. ABRAHAM..... T Physique.<br>E. CARTAN..... T Géométrie supérieure.<br>M. MOLLIARD..... T Physiologie végétale.<br>L. LAPICQUE..... T Physiologie générale.<br>E. VESSIOT..... T Mécanique analytique et Mécanique céleste.<br>A. COTTON..... T Recherches physiques.<br>J. DRACH..... T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.<br>Charles FABRY..... T Physique.<br>Charles PÉREZ... T Zoologie.<br>Léon BERTRAND.. T Géologie structurale et géologie appliquée.<br>P. PORTIER..... T Physiologie comparée<br>E. RABAUD..... T Biologie expérimentale.<br>M. GUICHARD..... Chimie minérale.<br>Paul MONTEL..... T Théorie des fonctions et Théorie des transformations.<br>P. WINTREBERT.. T Anatomie et histologie comparées.<br>L. BLARINGHEM.. T Botanique.<br>O. DUBOSCQ..... T Biologie maritime.<br>G. JULIA..... T Application de l'analyse à la Géométrie.<br>C. MAUGUIN..... T Minéralogie.<br>A. MICHEL-LÉVY.. T Pétrographie.<br>H. BÉNARD..... T Mécanique expérimentale des fluides.<br>A. DENJOY..... T Calcul différentiel et calcul intégral.<br>L. LUTAUD..... T Géographie physique et géologie dynamique.<br>Eugène BLOCH... T Physique théorique et physique céleste.<br>G. BRUHAT..... Physique.<br>E. DARMOIS..... Physique.<br>A. DEBIERNE..... T Radioactivité. | A. DUFOUR..... T Physique. (P. C. B.).<br>L. DUNOYER..... Optique appliquée.<br>A. GUILLERMOND. T Botanique (P. C. B.).<br>M. JAVILLIER..... Chimie biologique.<br>L. JOLEAUD..... Paléontologie.<br>ROBERT-LÉVY... Zoologie.<br>F. PICARD..... Zoologie (Évolution des êtres organisés).<br>Henri VILLAT.... T Mécanique des fluides et applications.<br>Ch. JACOB..... T Géologie.<br>P. PASCAL..... T Chimie minérale.<br>M. FRÉCHET..... T Calcul des Probabilités et Physique mathématique.<br>E. ESCLANGON... T Astronomie.<br>M <sup>me</sup> RAMART-LUCAS T Chimie organique.<br>H. BÉGHIN..... T Mécanique physique expérimentale.<br>FOCH..... Mécanique expérimentale des fluides.<br>PAUTHENIER..... Physique (P. C. B.).<br>De BROGLIE..... T Théories physiques.<br>CHRÉTIEN..... Optique appliquée.<br>P. JOB..... Chimie générale.<br>LABROUSTE..... Physique du Globe.<br>PRENANT..... Zoologie.<br>VILLEY..... Mécanique physique et expérimentale.<br>BOHN..... Zoologie (P. C. B.).<br>COMBES..... Botanique.<br>GARNIER..... Calcul différentiel.<br>PÉRES..... Mécanique des fluides.<br>HACKSPILL..... Chimie (P. C. B.).<br>LAUGIER..... Physiologie générale.<br>TOUSSAINT..... Technique Aéronautique.<br>M. CURIE..... Physique (P. C. B.).<br>G. RIBAUD..... T Hautes températures.<br>CHAZY..... T Mécanique rationnelle.<br>GAULT..... Chimie (P. C. B.).<br>CROZE..... Physique.<br>DUPONT..... T Théories chimiques.<br>LANQUINE..... Géologie.<br>VALIRON..... Mathématiques |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Secrétaire..... A. PACAUD.  
Secrétaire honoraire..... D. TOMBECK.



# RECHERCHES SUR LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DES ROCHES

Par Mme F. BAYARD-DUCLAUX

## INTRODUCTION

L'étude de la conductibilité électrique de roches se rattache, en raison de sa complexité, à de nombreuses questions particulières étudiées depuis longtemps ; résistivité des minéraux et des semi-conducteurs, étude des divers agents pouvant influencer sur la conductibilité, prospection électrique où les propriétés sont étudiées à l'état de gisement. Les connaissances sur les roches, en général, sont encore incomplètes et l'objet de ce travail a été de fournir sur celles-ci un ensemble de renseignements systématiques permettant de rapprocher leurs propriétés électriques de celles de corps voisins déjà étudiés. Mes expériences ont donc porté sur un ensemble de roches choisies volontairement de nature et d'origine très diverses et ne présentant aucune propriété spéciale de façon à placer ce travail dans un cadre de caractère très général.

Ces expériences ont été poursuivies dans les laboratoires de l'Institut de Physique du Globe, sous la haute direction de M. le Professeur Ch. Maurain, Membre de l'Institut, Doyen de la Faculté des Sciences, à qui je suis particulièrement heureuse de pouvoir exprimer ici ma sincère reconnais-

sance pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués ainsi que pour la bienveillance et l'aide matérielle continue qu'il a bien voulu m'accorder. J'adresse l'expression de ma gratitude à M. le Professeur A. Michel Lévy pour les matériaux d'étude qu'il m'a choisis et l'intérêt bienveillant qu'il a témoigné à mes recherches. Je tiens également à remercier M. E. Salles, physicien adjoint à l'Institut de Physique du Globe pour tous les conseils amicaux qu'il m'a si souvent donnés. Je remercie M. Jouaust, sous-directeur du Laboratoire central d'électricité ainsi que M. de la Gorce, chef de service, et tous mes Collègues du Laboratoire pour leur aide obligeante; ainsi que les nombreuses entreprises, notamment la Société Rodio, qui m'ont aimablement procuré un très grand nombre de roches diverses.

---

## CHAPITRE PREMIER

### Etat de la question.

J'exposerai ici les résultats auxquels m'a conduit l'étude critique des renseignements que j'ai pu recueillir dans la bibliographie de la question. Celle-ci est très disséminée et il a été nécessaire de la chercher dans des périodiques très variés, spécialisés dans des sciences diverses, Chimie, Physique, Minéralogie, Electrotechnique, etc , et qui sont souvent très peu répandus. Il se peut que quelques mémoires m'aient échappé. Il est impossible, d'autre part, de donner une bibliographie ne concernant que les roches elles-mêmes sans tenir compte des minéraux constitutifs de celles-ci et des semi-conducteurs en général. Ces divers corps ont un très grand nombre de propriétés communes et les mêmes problèmes se posent à propos de tous. C'est pour cette raison que, dans ce qui suit, je parlerai indifféremment des roches, des minéraux naturels, des sels solides et des isolants industriels en m'attachant à faire ressortir les propriétés communes à tous ces corps et leur similitude avec les propriétés des roches.

On trouvera à la fin du travail, la liste de toutes les références bibliographiques que j'ai pu recueillir. Je me suis reportée personnellement à toutes celles qui pouvaient être accessibles, me contentant pour les autres des renseignements donnés dans les mémoires qui les citent.

**Généralités.** — L'étude bibliographique de la question ne peut conduire à des résultats définitifs, car les connaissances actuelles sur la conductibilité électrique des roches et des

semi-conducteurs en général sont encore très confuses. Les auteurs sont en complet désaccord dans la plupart des cas et on ne peut, parmi ces opinions diverses, en dégager aucune qui soit plus fondée que les autres, car toutes reposent sur des faits expérimentaux. Ce sont ces faits expérimentaux eux-mêmes qui sont contradictoires et j'ai dû me contenter de les noter en groupant ceux qui semblent devoir appuyer telle ou telle théorie et en faisant ressortir, d'autre part, les contradictions essentielles.

Les propriétés électriques des roches ne se présentent donc pas comme des propriétés caractéristiques et nettement définies. Elles dépendent, de plus, d'un nombre considérable de facteurs et cette dépendance ne paraît pas, jusqu'ici, pouvoir être représentée par des lois.

**Conductibilité électrique des minéraux constitutifs des roches.** — Une roche est un ensemble plus ou moins compact de minéraux dans l'intervalle desquels se trouve, en général, un liquide d'imbibition. Sa conductibilité électrique doit donc dépendre principalement de sa constitution minéralogique, de sa structure et de la nature du liquide dont elle est imprégnée.

Il est important, en premier lieu, de se rendre compte de la valeur de la conductibilité électrique des minéraux constitutifs des roches. Des mesures en ont été faites, par de nombreux auteurs. D'après Reich (65) on peut les classer en trois groupes de la façon suivante :

1) Le groupe des mauvais conducteurs dont la résistivité électrique est comprise entre  $10^{14}$  et  $10^{16}$  ohms/cm<sup>3</sup> et qui contient presque tous les minéraux.

2) Le groupe des conducteurs moyens,  $\rho = 10^3$  à  $10^{10}$  ohms/cm<sup>3</sup> composé des silicates et des oxydes riches en fer et en manganèse.

3) Le groupe des bons conducteurs,  $\rho = 10^{-6}$  à 100 ohms/cm<sup>3</sup> qui comprend le graphite, les métaux sous forme naturelle,

la plupart des sulfures métalliques (à l'exception de la blende et du cinabre) et la magnétite.

Cette classification est trop précise et dans la réalité on rencontre de nombreuses exceptions (sulfures métalliques se plaçant dans le deuxième groupe, silicates de résistivité plus faible, etc.).

Les minerais de fer, cuivre, plomb, arsenic, molybdène sont en général bons conducteurs.

**Influence de la constitution minéralogique.** — D'après les mesures de plusieurs auteurs la constitution minéralogique, c'est-à-dire spécialement la proportion en minéraux conducteurs donnerait à la roche un caractère de conductibilité.

Pour les roches composées de minéraux des deux premiers groupes, les preuves fournies à l'appui de cette théorie paraissent discutables et ne semblent pas pouvoir en donner une vérification absolue (55) (80). Lorsqu'il s'agit, par contre, des roches contenant des minéraux très conducteurs, c'est-à-dire des minerais, le phénomène apparaît d'une façon bien plus nette et la conductibilité se présente comme une fonction de la teneur en minéraux bons conducteurs. D'après Murashov, Berentgarten, Etcheistova et Kudiakova (55) on a pour des sulfures métalliques (en arrondissant les chiffres) :

| Minerais                           | Proportion<br>en bons conducteurs | Résistivité              |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Pyrite magnétique et pyrite        | 50 0/0                            | 130 ohms/cm <sup>2</sup> |
| Mineral de plomb . .               | 20 à 50 0/0                       | 3 400 »                  |
| Quartz avec pyrite . .             | 5 à 20 0/0                        | 85 500 »                 |
| Roche contenant minerais . . . . . | moins de 5 0/0                    | 3 10 <sup>9</sup> »      |

D'une façon générale, la présence d'un minéral augmente considérablement la conductibilité de la roche ; c'est ce qui se présente pour les schistes imprégnés de pyrite (67). Il faut cependant signaler de nombreuses exceptions dues, en général, à la structure de la roche, et dues, aussi parfois, à son état de décomposition. La décomposition d'une roche augmente beaucoup sa conductibilité ; c'est ainsi que des morceaux de la gangue d'un minéral, contenant de la glaise humide et du schiste décomposé conduisent aussi bien que des parties de gangue riches en minéral (67).

**Influence de la structure. Anisotropie.** — Un facteur important de la conductibilité électrique des roches est, nous l'avons dit, sa structure. Le fait d'avoir une structure cristalline différencie nettement la roche, au point de vue conductibilité, des éléments chimiques qui la constituent. Ces différences semblent dues à des irrégularités de contact dans la masse et résortent nettement des expériences où l'on a comparé les résistivités d'un cristal et de l'agrégat formé par la poudre du même cristal, fortement comprimée. Mönch (54) a montré que de la poudre de galène comprimée conduit 100 fois plus que le cristal.

Les effets de structure peuvent arriver à masquer l'influence des éléments plus conducteurs contenus dans les roches. Une roche où le minéral se présente en grosses masses conductrices entourées d'une gangue isolante peut être beaucoup plus résistante qu'une roche où le minéral se présente en plus petites quantités mais sous forme lamellaire formant un réseau conducteur continu. C'est ainsi qu'un schiste imprégné de pyrite sous forme de petites lamelles conduit beaucoup mieux qu'un porphyre contenant de la pyrite en quantité plus grande mais sous forme de prismes éloignés les uns des autres (67).

En général, l'anisotropie des cristaux ne joue aucun rôle dans la masse d'une roche où ceux-ci sont arrangés dans un

ordre absolument quelconque, sans direction privilégiée. On a, presque toujours, une résistivité moyenne indépendante des directions de cristaux. L'anisotropie de la roche, par contre, est parfois d'une grande influence. On peut diviser les roches anisotropes en deux classes (65) : les roches anisotropes en grande masse (roches stratifiées, sédiments clastiques) et les roches anisotropes à la fois en grandes masses et en échantillons (roches schisteuses). La structure des premières est décelable sur le terrain seulement (74), celle des roches schisteuses est aussi décelable au laboratoire. Celles-ci fournissent dans les deux directions principales, des résistivités différentes. Kœnigsberger (39) donne, pour une ardoise de Portland :

parallèlement à la schistosité. . . .  $\rho = 52 \cdot 10^4$

perpendiculairement. . . . .  $\rho = 12 \cdot 10^6$

et Ebert pour un schiste argileux (22) :

parallèlement à la schistosité. . . .  $\rho = 2 \cdot 10^5$

perpendiculairement . . . . .  $\rho = 1,5 \cdot 10^6$

**Influence des liquides d'imbibition.** — Les roches naturelles sont toujours imprégnées de liquide et de nombreux auteurs, Reich (65), Heine (33), Schlumberger (72) (74), admettent que l'influence de ces liquides est prépondérante. Ceux-ci peuvent augmenter ou diminuer la résistance des roches qu'ils imprègnent suivant leur conductibilité propre. Les liquides naturels très résistants sont le pétrole et toutes les huiles qui s'y rattachent ; leur résistivité, d'après Kœnigsberger (40) est comprise entre  $10^{14}$  et  $10^{18}$  ohms/cm<sup>3</sup> et leur présence dans les pores et interstices d'une roche en augmente la résistivité qui est toujours supérieure à  $10^7$  ohms/cm<sup>3</sup>. C'est ainsi qu'un sable micacé contenant des traces d'huile a une résistivité de  $2 \cdot 10^7$  ohms/cm<sup>3</sup>, tandis que le même, sans trace d'huile, possède une résistivité de  $3,5 \cdot 10^6$  ohms/cm<sup>3</sup> (67). Les liquides qui augmentent, au contraire, la conductibilité sont toutes les eaux naturelles. Celles-ci peuvent avoir de

très fortes conductibilités, principalement si elles contiennent des sels en solution. Hlauschek (34) donne, pour les eaux souterraines non salées une résistivité de 3 000 à 15 000 ohms/cm<sup>3</sup>. L'eau souterraine possède, d'après le même auteur, une résistivité de 57 ohms/cm<sup>3</sup> pour une teneur en ClNa égale à 1 0/0 et une résistivité de 4,65 ohms/cm<sup>3</sup> pour une teneur du même sel égale à 26 0/0. Des roches imprégnées de telles eaux ont alors une résistivité très faible qui peut descendre jusqu'à 100 ohms/cm<sup>3</sup>.

Là aussi, le rôle de la structure de la roche, et en particulier de son volume poreux est très important. Si le volume des pores est variable dans la masse d'une roche (roche éruptive) on peut attendre, pour cette roche, une conductibilité variable d'un échantillon à l'autre; tandis que pour une roche à volume poreux constant on peut espérer une conductibilité plus uniforme (68). En général aussi, plus le volume poreux est grand, plus la résistance de la roche est faible. D'après Hlauschek (34) une roche ayant un volume poreux égal à 2 0/0 a une résistivité 150 fois plus grande que celle du liquide qui l'imbibé; quand le volume poreux devient 47,6 0/0, la résistivité de la roche n'est plus que 2,6 fois celle du liquide.

Lorsqu'il s'agit de mesures en laboratoire, l'influence de l'humidité peut être très gênante, en particulier celle de l'humidité de l'air. Baldwin-Wiseman et A. Griffith (9) montrent que cette influence est très rapide. D'après Leiste (45) cette action est d'autant plus grande que l'échantillon est plus rugueux. Gnann (26) étudiant le même phénomène quantitativement sur le quartz et la bakelite, montre que la conductibilité est une fonction parabolique de l'humidité de l'air ambiant. Rabinowitch et Wood (60) font la même expérience pour les zéolites et montrent que l'action de l'humidité est un phénomène réversible, l'échantillon desséché repassant, en sens inverse, par les mêmes valeurs.

Pour étudier le phénomène de plus près, on a eu recours à des imprégnations artificielles d'eau (26). D'après Baldwin-Wiseman et A. Griffith (9) après un bain de 20 à 30 heures dans l'eau la résistivité d'une pierre de construction calcaire décroît de  $2.10^{10}$  à  $10^5$  ohms/cm<sup>3</sup>. Une étude quantitative de certaine terre comprimée fournit les résultats suivants (49) : lorsqu'elle contient 5 o/o d'eau, sa résistivité est de  $2,34.10^6$  ohms/cm<sup>3</sup>, et celle-ci tombe à 5400 ohms/cm<sup>3</sup> pour une proportion d'eau égale à 33,3 o/o. La résistivité d'une pierre à chaux baignée pendant trois semaines dans l'eau et desséchée à l'air libre est représentée, en fonction de l'augmentation de masse, par une droite passant par l'origine (38). Keen (37) a également trouvé une représentation linéaire à partir d'une teneur en eau égale à 8 o/o ; en dessous la loi est différente et la conductibilité devient nulle pour une teneur en eau de 3,5 o/o. D'après cet auteur, ces résultats seraient en relation avec la continuité des pellicules d'eau recouvrant des grains en amas.

**Dessiccation.** — Il est donc nécessaire, lorsqu'on veut connaître la résistance propre de la roche, c'est-à-dire la résistivité qui n'est fonction que des deux facteurs, constitution minéralogique et structure, de la dessécher complètement. Il est difficile de définir ce que l'on entend par dessiccation complète de la roche, car il est peu probable que l'on puisse évaporer les liquides contenus dans les cavités intérieures de celle-ci. Les auteurs se sont donc contentés d'un critère expérimental de siccité. D'après Löwy (46) il suffit de maintenir la roche pendant dix heures au dessiccateur pour obtenir des résultats reproductibles. Baldwin Wiseman et A. Griffith (9) préconisent également un séjour de huit heures à l'étuve.

**Mode d'action de l'eau d'imbibition.** — Les auteurs ne sont pas d'accord sur le mode d'action de cette eau d'imbibition

et en général le phénomène n'est pas expliqué. J. H. Coste (18) cependant suppose que la conductibilité est due aux sels dissous dans l'eau, mais il ne peut s'agir uniquement des sels provenant de la roche elle-même ( $\text{CO}_2\text{Ca}$  dans le cas de la pierre à chaux). Le calcul montre en effet, que la solution saturée de ces sels a une conductivité trop faible et que la roche n'en peut absorber qu'une trop petite proportion pour donner une conductibilité globale comparable à celle que donne l'expérience. Il serait alors nécessaire d'imaginer la présence d'une autre catégorie d'ions.

**Influence de la durée de passage du courant.** — On a souvent remarqué que l'intensité du courant traversant un circuit contenant une roche ou un minéral, n'est pas constante. Cette intensité décroît, en général, d'une façon continue, quand la durée de passage du courant augmente (42). D'après B. Mac Collum et H. Logan (49) la résistivité de certaine terre comprimée croît, à partir de la fermeture du circuit, pendant un temps qui varie de quelques secondes à quelques heures. Elle aboutit, après cette durée, à un palier sensiblement uniforme. Le gypse et le sel gemme se comportent d'une façon analogue (71) ; pendant les tout premiers instants après l'établissement du courant (une demi-seconde) l'intensité du courant décroît beaucoup, puis sa décroissance devient plus faible et elle aboutit à un palier au bout de trois heures. Une fois ce palier atteint, les expériences deviennent reproductibles à une petite erreur près (variation inférieure à 5 o/o). D'après cet auteur, le rapport entre la conductibilité initiale et la conductibilité obtenue au palier est caractéristique de chaque cristal. Gnann (26) fait la même remarque pour le quartz et la bakelite, mais estime qu'un équilibre suffisant est atteint au bout de cinq minutes alors qu'il faut attendre dix heures pour obtenir un palier véritable. De toutes façons on voit, comme le fait remarquer Salessky (71) qu'il faut toujours,

lorsqu'on donne le résultat de mesures de résistivité d'un tel corps, fixer en même temps le temps qui s'est écoulé entre l'établissement du courant et la mesure. Des résultats ne sont comparables que lorsqu'ils sont obtenus à des intervalles égaux de la fermeture du circuit.

Il apparaît cependant, d'après les travaux de O. Weigel (87) que cette variation avec le temps ne se produit que pour les corps très résistants.

**Influence de la tension.** — Il s'agit ici de mesures en courant continu. D'une façon générale on peut affirmer d'après les résultats donnés par divers auteurs, que la résistivité d'une roche dépend de la tension à laquelle elle est soumise et diminue quand celle-ci augmente (89). D'après Rabinowitch et Wood (60) qui ont étudié les zéolites, l'intensité du courant qui traverse l'échantillon croît plus rapidement que la tension; il existe même un phénomène d'hystérésis qui consiste dans le fait suivant : Si après une série de mesures à tensions croissantes, on recommence l'expérience, les résultats ne sont pas les mêmes et la diminution de résistivité est encore plus grande. Il existe de plus une différence de potentiel limite au-dessous de laquelle les expériences se reproduisent, à quelques petites variations près, et au-dessus de laquelle se produisent des variations brusques et importantes de l'intensité du courant. Ces variations brusques ont été remarquées également par Watermann (85) sur la molybdénite pour laquelle existe une différence de potentiel critique qui correspond à un début de chute brusque de l'intensité. La molybdénite, étudiée également par Okubo (56) donne comme représentation de la variation de la résistivité avec la tension une courbe comportant deux points anguleux. D'après cet auteur, le premier point (4 v. 5) proviendrait des contacts et le second (88 v.) d'un changement électrique interne avec libération d'électrons. Dans d'autres cas, au contraire, on a

trouvé une variation continue de la résistivité avec la tension ; Gnann (26) montre que, pour le quartz et la bakelite, cette variation est représentable souvent par une droite et souvent par une courbe à concavité vers le haut et Salessky (71) affirme que la résistivité du quartz et du sel gemme suit la loi d'Ohm, à condition comme nous l'avons dit plus haut de faire les mesures à des intervalles égaux de l'établissement du courant dans le circuit. L'intensité, dans ce cas, est représentable par l'égalité :  $i = E f(t)$ ,  $t$  représentant le temps.

**Représentation analytique.** — On a essayé de représenter analytiquement cette variation de l'intensité qui traverse l'échantillon en fonction de la tension à laquelle il est soumis. Cette représentation n'est pas toujours possible d'une façon simple. Cependant Watermann (85) représente, d'une façon générale, l'intensité du courant qui traverse la molybdenite par la relation :

$$i = kv^b e^{-\frac{k}{T}}; \quad \text{où :} \quad b = 1,6 \quad \text{et} \quad k = 3\,000,$$

en fonction de la tension  $v$  et de la température absolue  $T$ . Si l'on suppose, comme dans le cas présent, que la température est constante, la valeur de l'intensité s'exprime, en fonction de la tension, par :

$$i = A v^b.$$

C'est donc une fonction exponentielle de la différence de potentiel. O. Weigel (87) étudiant la conductibilité des zéolites par une méthode électrométrique, montre que les résultats expérimentaux sont représentés avec une approximation suffisante par la relation :

$$t = \frac{a}{e^2} + \frac{b}{e},$$

où  $a$  et  $b$  sont des constantes et où  $t$  représente le temps que

met un électromètre que l'on charge à travers l'échantillon pour atteindre le potentiel  $e$ .

**Discussion.** — Le phénomène le plus simple qui pourrait créer une variation apparente de l'intensité en fonction de la tension serait la polarisation de l'échantillon. L'existence d'une polarisation crée, en effet, une augmentation apparente de la résistivité, augmentation qui est d'autant plus importante que la tension à laquelle est soumis l'échantillon est plus faible.

Néanmoins, les données expérimentales ne sont pas, en général, d'accord avec cette hypothèse et la plupart des auteurs, après l'avoir émise, la rejettent (23) (87). Rabino-witch et Wood (60) montrent qu'elle est incompatible avec le phénomène d'hystérésis qu'ils ont remarqué et Mikhaïlov (53) suggère que la cause prépondérante dans cette action de la différence de potentiel est l'influence des contacts. D'après lui, le phénomène n'existe pas pour un contact parfait (contact à mercure) et implique à la fois un mauvais contact et un isolant de forte résistance (résistance variant de  $10^6$  à  $10^9$  ohms/cm<sup>3</sup>). Cette hypothèse d'une polarisation paraît à Seeliger (76) n'être qu'un simple artifice de calcul et il serait d'après lui, absolument vain d'essayer d'appliquer la loi d'Ohm à de tels semi-conducteurs. Celle-ci serait inapplicable *à priori* et les différences seraient dues à des causes plus profondes. Les caractéristiques du courant dans un corps semblable seraient tout autre que dans un conducteur soumis à la loi d'Ohm et l'application de celle-ci ne ferait que masquer une propriété caractéristique de la matière.

**Influence de la température.** — La conductibilité électrique d'une roche est très sensible au moindre écart de température et croît presque toujours quand la température augmente. Le phénomène n'est pas absolument général et il y a des

cas où la variation contraire se produit et d'autres même où l'on a successivement décroissance et croissance.

La croissance de la conductibilité en fonction de la température a été de nombreuses fois étudiée (12) (71) (86) et dans la majorité des cas on trouve, pour celle-ci, une variation continue. Königsberger et Reichenheim (42) étudient les oxydes et sulfures métalliques entre  $-185^{\circ}$  et  $+500^{\circ}$  et montrent qu'on obtient pour tous ces minéraux, à l'exception de la pyrite, des courbes continues semblables représentant une diminution rapide de la résistance quand la température augmente. Rabinowitch et Wood (60) retrouvent le même phénomène pour les zéolites et remarquent que la variation est d'autant plus faible que la roche est plus desséchée, ce qui tendrait à prêter à l'eau une influence prépondérante dans le mécanisme de la conductibilité électrique. Okubo (56) obtient, de même, une courbe continue décroissante pour la résistivité de la molybdénite et remarque, de plus, que pendant le refroidissement on obtient des points situés sur la courbe correspondant à l'échauffement ce qui prouve que le phénomène est réversible et qu'il ne s'est produit, pendant l'expérience, aucune altération de la matière.

Pour d'autres minéraux, on trouve au lieu de variations continues, des courbes à brusques changements d'allure; c'est ainsi que Watermann (85) montre que le simple échauffement électrique dû au passage du courant dans la molybdénite produit, au-dessus d'une certaine différence de potentiel, une chute brusque de la conductibilité. B. Mac Collum et H. Logan (49) ont étudié la résistivité de certaines terres comprimées entre  $-20^{\circ}$  et  $+20^{\circ}$ . Celle-ci décroît, mais subit à  $0^{\circ}$ , un changement brusque dans l'allure de sa variation. Ce point correspond au point de congélation de l'eau et l'on sait (61) qu'à cette température, la résistivité de l'eau subit une variation brusque, ce qui permettrait encore

ici de supposer que l'eau a une action prépondérante sur la conductibilité des terres.

D'autres auteurs citent, enfin, un phénomène que l'on peut considérer comme un phénomène d'hystérésis. D'après Wilson et Herroun (89) si l'on chauffe de la magnétite à des températures croissantes et si l'on mesure sa résistivité lorsqu'elle atteint par refroidissement une température fixe, la conductibilité à cette température diminue constamment. Dans ce cas le phénomène n'est pas réversible et les chiffres suivants le prouvent : après cinq chauffages successifs à 400°, 500°, 600°, 800° et 920°, la conductibilité d'un échantillon de magnétite a baissé de 87,2 o/o.

Par contre Watermann (85) a remarqué un phénomène analogue mais de signe contraire, pour la molybdénite lorsqu'elle a été chauffée au-dessus de 400°, et même lorsqu'elle a été chauffée par le passage d'un courant suffisant dans des conditions appropriées. D'après cet auteur, il serait possible à l'aide d'un courant convenable de changer, par étages successifs, un isolant ayant une résistance de quelques mégohms en un conducteur de quelques ohms obéissant à la loi d'Ohm. De tels changements suggèrent une variation dans la structure interne de la matière et sont en complet désaccord avec le principe de réversibilité énoncé plus haut.

**Représentation analytique.** — L'expérience a montré qu'il existe pour un grand nombre de sels solides une relation linéaire entre le logarithme de la conductibilité et l'inverse de la température absolue (8) (11) (35) (38) (61) qui s'écrit  $\text{Log } K = A - \frac{B}{T}$  et qui est valable pour un grand nombre de sels solides.

Cette loi, qui relie linéairement le logarithme de la conductibilité à l'inverse de la température absolue a été vérifiée expérimentalement pour des minéraux naturels (sel

gemme et gypse (71)). Elle est valable également pour la molybdénite (85) avec  $B = 3\,000$ . On ne peut affirmer que cette loi exponentielle soit applicable à tous les minéraux et les roches naturelles. Toutes les mesures expérimentales ne confirment pas cette théorie, et certaines même donnent des résultats absolument contraires. Wilson et Herroun montrent, en effet (89), qu'une loi exponentielle est inapplicable à la magnétite ; le coefficient exponentiel n'est pas constant et diminue quand la température augmente. A Königsberger, Schilling et Reichenheim (42) (43), le phénomène apparaît encore plus compliqué car on n'a pas toujours affaire à un accroissement de conductibilité avec la température. Certains auteurs (28) (84) ont trouvé pour des isolants un coefficient exponentiel positif, qui correspond à un accroissement de résistance avec la température comparable à celui des métaux. L'étude à températures croissantes de la magnétite, de la pyrite magnétique et des oxydes et sulfures métalliques montre que la résistance décroît, passe par un minimum et croît de nouveau. Ce point de changement de signe pour le coefficient de température correspond à des températures variables suivant les minéraux c'est-à-dire par exemple  $160^{\circ}$  pour la magnétite et de  $1\,200^{\circ}$  pour une pyrite de fer. D'une façon générale, la conductibilité électrique de tels corps est représentée, en fonction de la température, par :

$$x = x_0(1 + \alpha t + \beta t^2)e^{\frac{-\gamma t}{(t + 273)273}} \quad (41)$$

avec :

$$\alpha \neq \frac{1}{273} ,$$

$$-0,000009 < \beta < 0,000009.$$

$\gamma$  étant un facteur qui n'est pas exactement constant mais l'est pratiquement d'une façon suffisante.

**Existence d'une direction privilégiée.** — L'étude des minéraux montre qu'ils possèdent parfois, en dehors des quelques

particularités importantes dont je viens de parler, quelques propriétés qui leur semblent propres.

Certains possèdent, par exemple, une direction privilégiée pour le passage du courant : lorsqu'on les soumet dans des sens différents à une même différence de potentiel l'intensité qui les traverse dépend du sens choisi, et cela d'une façon qui semble parfois assez arbitraire (86). Pour la pyrite cuivreuse, la pyrite et la galène (13) il existe entre les intensités suivant deux directions opposées une différence qui croît avec celles-ci, l'intensité dans la direction à résistance minima augmente alors que l'intensité dans le sens opposé diminue et pour de très petites valeurs du courant, il peut y avoir échange entre les deux directions. Pour le psilomélane, d'après Meyer (52) cette particularité n'existe que dans certains échantillons et la différence entre les deux intensités dépend, d'une façon qui paraît arbitraire, de la grandeur de celles-ci ; elle peut même changer de signe par simple changement d'intensité.

En tous cas, ce phénomène ne semble pas caractéristique d'un minéral, puisque deux échantillons d'un même minéral se conduisent différemment ; mais il semble plutôt caractéristique d'un échantillon déterminé et cela pour des causes encore inconnues. Des expériences de Braun montrent que cette propriété du minéral, quand elle existe, n'est due ni à un mauvais contact, ni à une force thermoélectrique.

**Principe de superposition.** — L'action d'un champ électrique semble faire varier la conductibilité électrique d'un minéral, et celle-ci est parfois fonction, outre les facteurs indiqués plus haut, de toute l'histoire antérieure de celui-ci. D'après Meyer (52) le passage dans l'échantillon d'un courant induit alternatif superposé au courant continu peut faire varier la résistance en courant continu, que les deux intensités soient de même direction ou rectangulaires. L'auteur, cependant, ne fait que citer le phénomène sans

donner une preuve nette de son existence. Adams et Day (5) montrent que le passage d'un courant dans un sens facilite le passage dans le sens opposé d'un courant qui suit immédiatement le premier. Enfin, d'après Salessky (71) si l'on soumet pendant deux minutes un cristal de gypse ou de sel gemme à une différence de potentiel de 330 volts, et si l'on mesure sa conductibilité après quelques secondes de mise au sol, celle-ci a varié de 15 à 20 0/0 de la valeur qu'elle avait avant l'expérience. C'est ce phénomène que l'auteur nomme : principe de superposition.

Notons enfin quelques particularités qui ont été dégagées pour un certain nombre de roches. On a pu mettre en évidence, pour certains matériaux de construction, une force électromotrice propre qui donne l'effet suivant : les deux extrémités de l'échantillon étant reliées à un galvanomètre on observe un courant qui est parfois variable, et parfois constant pendant plusieurs semaines et qui peut, sans cause apparente, changer brusquement de signe (38). Cette force électromotrice semble être d'origine électrolytique et provenir d'une concentration non uniforme de sels solubles de la pierre, mais elle n'affecte pas en général la mesure, sa plus grande valeur observée étant égale à 0,05 volts.

Citons enfin la différence de potentiel créée par le passage d'un courant d'eau à travers l'échantillon (14).

**Nature de la conductibilité.** — Une question importante, mais qui ne paraît pas résolue à l'heure actuelle, est celle de la nature de la conductibilité des roches et des minéraux. Cette conductibilité peut être, en effet, électronique, électrolytique ou formée de la superposition des deux sortes de conductibilité. Théoriquement, la différenciation entre ces divers modes de passage du courant est très simple puisque dans le premier cas, le transport de l'électricité, est dû à un déplacement d'électrons et dans le deuxième cas à un déplacement d'ions. Mais pratiquement le choix est plus difficile

car il n'existe pas de propriété caractérisant d'une façon absolue l'un ou l'autre de ces deux modes de conductibilité. Les critères expérimentaux pour la conductibilité électrolytique sont les suivants (51) : 1<sup>o</sup> Altération chimique de l'échantillon ; 2<sup>o</sup> Apparition aux électrodes des produits d'électrolyse obéissant à la loi de Faraday ; 3<sup>o</sup> Existence d'une polarisation galvanique ; 4<sup>o</sup> Aptitude de la substance à former une pile ; 5<sup>o</sup> Signe du coefficient de température celui-ci devant être positif pour les corps à conductibilité métallique et négatif pour les corps à conductibilité électrolytique. Notons cependant que ce critère ne peut être que secondaire car il existe de nombreuses exceptions où des corps à conductibilité métallique ont un coefficient de température négatif.

Examinons maintenant les résultats que l'on obtient quand on applique aux roches et aux minéraux l'un ou l'autre de ces critères expérimentaux. L'altération chimique n'a jamais été notée à ma connaissance. Rabinowitch et Wood (60) ont pu déceler, après passage du courant dans des zéolites, la présence aux électrodes de produits d'électrolyses obéissant à la loi de Faraday. Ces expériences tendraient donc à prouver la nature électrolytique de la conductibilité. Par contre, les auteurs ne sont pas d'accord sur l'existence d'une polarisation galvanique (86) et les résultats sont très variables. Pour citer des exemples précis, notons que pour la magnétite et l'ilménite (43), on n'a pas pu trouver de force contre-électromotrice supérieure à 0,0001 volt ; le résultat a été le même après passage de 3,5 amp./heure dans la galène (54) et après passage de 2 amp./heure dans la cassitérite (52). Notons cependant pour certaine terre comprimée (49) une polarisation aux électrodes, qui n'est pas la même pour les deux électrodes et qui diminue avec la durée de passage du courant. Cette polarisation varie lorsqu'on imbibe la terre de solutions salées et dépend également de la nature des électrodes. L'aptitude à former une pile a été remarquée comme

on l'a vu précédemment pour certain matériau de construction <sup>(1)</sup>. Quant au signe du coefficient de température il donne des résultats extrêmement variables. Il est en général négatif, comme on l'a vu précédemment, ce qui prouverait la nature électrolytique de la conductibilité. Mais dans certains cas il peut être positif et même subir des changements de signe. Dans ce cas <sup>(42)</sup> les minéraux ont pour des températures très élevées une résistance analogue à celle des métaux ce qui conduit à supposer que le signe du coefficient de température dépend bien plus de la valeur de la résistance et de la structure de l'échantillon que de la nature de la conductibilité.

En définitive, il semble que les deux formes de conductibilité ne soient pas caractéristiques d'un corps mais qu'elles appartiennent à tous les conducteurs, bon, semi ou mauvais, d'une façon plus ou moins notable.

**Conclusion.** — Ainsi que l'on a pu le voir dans cette étude générale, la question de la conductibilité électrique des roches apparaît comme très délicate. Deux échantillons de la même roche ne se conduisent pas de la même façon et au même état apparent correspondent souvent des résultats tout à fait différents, ces différences pouvant aller jusqu'à la contradiction complète. Il semble, en tous cas, que la conductibilité ne puisse pas caractériser une roche déterminée, et que l'on ait toujours affaire, au lieu d'un cas général, à un cas d'espèce où les propriétés de l'échantillon sont plus ou moins masqués par des conditions extérieures : conditions de mesure différentes (particularités dans les contacts <sup>(38)</sup>) ou action de l'un des nombreux facteurs qui ont été signalés plus haut.

(1) V. p. 17.

---

## CHAPITRE II

### Description de la méthode.

Plusieurs méthodes de mesure de la résistance des roches pouvaient être envisagées.

1<sup>o</sup> Pont de Wheatstone en courant alternatif ou continu.

2<sup>o</sup> Circuit simple en courant alternatif ou continu.

Parmi ces méthodes, seule la dernière a été adoptée pour ce travail.

J'examinerai tout d'abord les différentes méthodes étudiées, en faisant ressortir les raisons qui me les ont fait rejeter.

**Pont de Wheatstone en courant alternatif.** — Cette méthode est celle qui paraît, *a priori*, la meilleure, car elle exclut complètement toute erreur due à une polarisation possible de la roche. C'est elle qui a été étudiée en premier lieu et je tiens à adresser ici mes plus vifs remerciements à M. Jouaust, sous-directeur du Laboratoire Central d'Électricité, pour les précieux conseils qu'il a bien voulu me donner à ce sujet et à M. De La Gorce, chef de service, pour son aide très efficace qui m'a permis de mettre rapidement au point cette méthode délicate.

La fréquence du courant est d'une très grosse importance pour les mesures en courant alternatif, dès qu'il ne s'agit plus de résistances pures. Or, l'ensemble de l'échantillon de roche et de son montage peut, comme nous le verrons, présenter une capacité appréciable, pouvant influencer sur les mesures.

1<sup>o</sup> *Fréquence musicale*. — La méthode la plus simple consiste à employer une fréquence de 500 périodes et un téléphone sur la diagonale du pont, les autres branches étant constituées par des boîtes de résistance. Dans le cas actuel, le courant était fourni par un oscillateur triode et filtré, et la roche était simplement serrée dans un étau, suivant la méthode préconisée par divers auteurs (46) (47) (87), entre deux coussinets de feuilles d'étain. Il ne s'agit là, en effet, que de mesures préliminaires destinées à mettre au

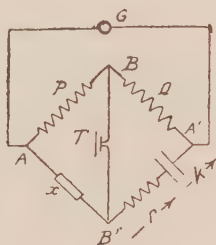


Fig. 1. — Disposition en série de la capacité variable.

point une méthode déterminée. Dans ces conditions l'influence des capacités rend le réglage précis impossible et l'on n'obtient de silence pour aucune valeur de la résistance variable. Le seul réglage possible correspond à la moyenne entre deux valeurs de la résistance variable donnant l'égalité de sons, mais la précision obtenue ainsi est insuffisante. Il a donc fallu essayer d'améliorer la méthode, en corrigeant autant que possible les effets de capacité.

a) Capacité de la branche contenant l'échantillon. L'influence de cette capacité peut se corriger de deux façons différentes, par l'adjonction d'une capacité variable (16).

Disposition en série : La capacité variable  $k$  est en série avec la résistance variable  $r$  (fig. 1).  $P$  et  $Q$  sont des résistances pures et  $x$  présente une résistance ohmique  $R$  et une

capacité  $C$ . Dans ces conditions, l'équilibre du pont s'écrit :

$$\frac{P}{Q} = \frac{R - \frac{j}{c\omega}}{r - \frac{j}{k\omega}}$$

ce qui donne les deux relations :

$$R = \frac{P}{Q} r \quad C = \frac{Q}{P} k.$$

Un réglage simultané de  $r$  et de  $k$  élimine donc l'influence perturbatrice de la capacité  $C$  et la relation donnant la résis-

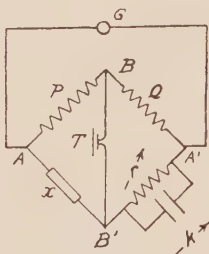


Fig. 2. — Disposition en parallèle de la capacité variable.

tance inconnue  $R$  n'en reste pas moins la relation fondamentale du pont de Wheatstone.

Disposition en parallèle : La capacité variable  $k$  est en parallèle avec la résistance variable  $r$  (fig. 2). Toutes les indications étant les mêmes que précédemment, l'équilibre du pont s'écrit :

$$\frac{P}{\frac{1}{r} + jk\omega} = Q \left( R - \frac{j}{c\omega} \right)$$

ce qui fournit les deux relations :

$$R = \frac{P}{Q} \frac{r}{1 + k^2\omega^2 r^2} \quad C = \frac{Q}{P} \left( k + \frac{1}{k\omega^2 r^2} \right).$$

Le réglage simultané de  $r$  et de  $k$  élimine, de même,

l'influence perturbatrice de la capacité  $C$ . Mais la relation donnant la résistance inconnue  $R$  fait intervenir la fréquence et la capacité accessoire  $k$ . Elle est donc d'un emploi moins

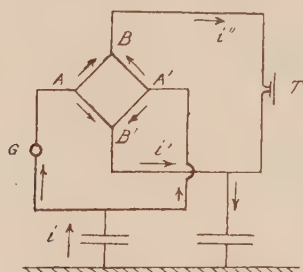


Fig. 3. — Influence des capacités des diagonales du pont par rapport au sol.

simple, mais la méthode permet l'utilisation de résistances plus faibles.

b) Capacité des diagonales du pont par rapport au sol.

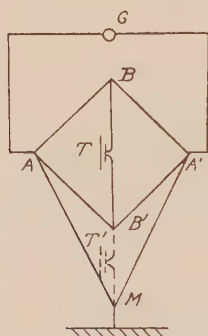


Fig. 4. — Dispositif de Willy-Wagner.

Si les deux diagonales du pont ont des capacités par rapport au sol, ces capacités relient ces deux branches entre elles par l'intermédiaire du sol et il se produit un courant de cir-

culatlon qui ne peut se fermer que par les branches du pont (fig. 3). Le silence est, de ce fait, complètement impossible et il est nécessaire d'employer un artifice : le montage de Willy Wagner (16). Cette méthode consiste à mettre la branche du téléphone au potentiel du sol en shuntant le pont principal par un pont supplémentaire dont un point est toujours au sol (fig. 4). L'obtention d'un silence simultané suivant les diagonales  $BB'$  et  $B'M$  prouve que le potentiel de

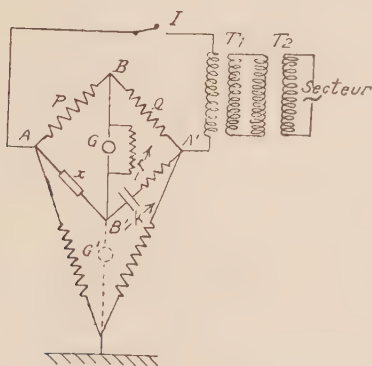


Fig. 5. — Schéma du circuit en courant alternatif.

la branche du téléphone est égal à celui du sol. Aucun courant de circulation n'est donc plus possible.

L'expérience a montré que, malgré toutes les précautions, on ne peut éliminer complètement les causes perturbatrices. La méthode a donc été abandonnée pour une méthode analogue utilisant des courants à fréquence dix fois plus faible. On pouvait espérer que, dans ces conditions, les influences perturbatrices qui augmentent avec la fréquence, joueraient un rôle moins considérable.

2<sup>o</sup> *Fréquence du secteur.* — Même montage que précédemment, les seules différences proviennent de la source de courant et de l'appareil de zéro. Le courant est celui que

fournit la ville, sous une fréquence de 50 périodes, et le téléphone est remplacé par un galvanomètre à résonance, système Campbell de la Société Cambridge. Cet appareil possède un réglage très précis suivant la période, mais une sensibilité relativement faible ( $10^{-6}$  ampère pour 1 mm. de largeur de plage).

Comme dans le cas précédent, le pont de Wheatstone ordinaire ne donne pas de résultats satisfaisants. On s'est efforcé, comme précédemment, d'annuler le courant résiduel en adjoignant au pont une capacité variable sur la branche de la résistance variable et en le modifiant suivant la méthode de Willy Wagner. Dans l'emploi de ce dispositif, l'alimentation par le secteur présente de sérieux inconvénients du fait du retour par le sol du courant alternatif et il est nécessaire d'isoler complètement le circuit, en alimentant le tout par l'intermédiaire de deux transformateurs (110 v.-2 v.) en série (fig. 5). Dans ces conditions, la méthode donne une précision suffisante égale à 2 0/0 et permet de bonnes mesures. Mais elle présente des inconvénients qui sont dus, non à la méthode elle-même, mais à la complexité du sujet. Chaque mesure est, en effet, longue et délicate et nécessite de nombreux réglages (double réglage de pont avec résistances et capacités). La méthode est excellente pour mesurer des résistances bien déterminées, mais en raison de sa complexité, elle semble très peu recommandable pour la mesure de résistances éminemment variables telles que celles des roches naturelles. Il a donc paru plus intéressant de chercher une méthode permettant des mesures simples et rapides et susceptible par conséquent, de servir à l'étude des différents facteurs influant sur la conductibilité électrique des roches.

Le pont de Wheatstone en courant continu a été rejeté *a priori* parce qu'il n'offrait pas les avantages du courant alternatif et qu'il nécessitait des opérations de réglage relativement longues.

**Circuit simple.** — En vue de simplifier le plus possible, j'ai éliminé de prime abord le courant alternatif, en raison des effets de capacité qu'il pourrait introduire.

La méthode employée consiste à faire passer à travers la roche le courant fourni par une batterie d'accumulateurs et à déterminer l'intensité du courant à l'aide d'un galvanomètre sensible.

Les accumulateurs sont des éléments cadmium-nickel pouvant fournir au total 600 volts, par fractions de 40 volts.

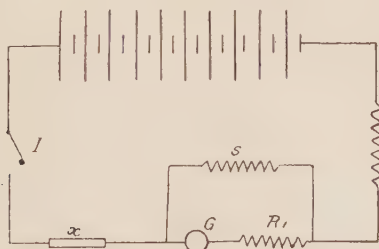


Fig. 6. — Schéma du circuit en courant continu.

Leur capacité, dans le cas présent, est suffisante car on ne leur demande qu'un très faible débit ( $10^{-5}$  ampères au maximum). Le galvanomètre est un appareil mural, Chauvin et Arnoux, d'une sensibilité relativement élevée ( $10^{-8}$  ampères) qui ne présente qu'un inconvénient, celui d'avoir une résistance critique trop élevée, ce que l'on corrige par l'adjonction d'une résistance en série. Dans la suite de ce travail, le shunt a toujours porté sur une résistance totale de 10.000 ohms. Le seul inconvénient de cette méthode est d'introduire dans le circuit une résistance supplémentaire qui augmente les risques de fuite de courant dans le circuit. Celui-ci comprend, en outre, une résistance de garantie de 100.000 ohms, destinée à protéger le galvanomètre contre les courants trop élevés qui peuvent se produire dans la mesure de quantités aussi variables que la résistance des roches,

## CHAPITRE III

### Description du montage.

**Forme et dimensions des échantillons.** — Les fragments de roche sur lesquels porte ce travail sont, soit des morceaux de forme absolument quelconque, soit des parties de carottes de sondage d'une forme suffisamment allongée. Dans les blocs irréguliers, on a taillé des échantillons ayant la forme de prismes rectangulaires et l'on a profité de la forme cylindrique des carottes pour en tirer des éprouvettes cylindriques par aplanissement et polissage de deux extrémités perpendiculaires à l'axe. D'une façon générale, les dimensions ont été choisies de telle façon que l'élançement des échantillons soit au moins égal à 2 et la section de  $1\text{ cm}^2$  au moins. Le polissage des extrémités est différent selon les cas; il dépend en partie de la nature de la roche.

**Montage à hautes pressions variables.** — La méthode employée consiste à faire passer le courant dans l'échantillon, entre ses deux extrémités planes, en mettant celles-ci en contact intime avec des conducteurs métalliques reliés au circuit général. Il y a donc nécessité de serrer l'échantillon entre deux masses conductrices, parfaitement isolées l'une de l'autre.

J'ai employé deux modes de montage différents, selon que la roche devait être étudiée dans l'air ambiant ou dans une enceinte fermée protégée contre l'humidité extérieure et isolée thermiquement.

Dans le second cas, l'échantillon est serré entre deux

étriers à tiges en laiton et plaques d'ébonite (fig. 7); les étriers n'ayant aucun point commun, l'isolement est aussi bon que possible. L'étrier supérieur est suspendu, par l'intermédiaire d'une poulie isolante, à une potence fixée à la table; l'étrier inférieur est lié, également par l'intermédiaire d'une poulie isolante, à un système de poids. L'ensemble

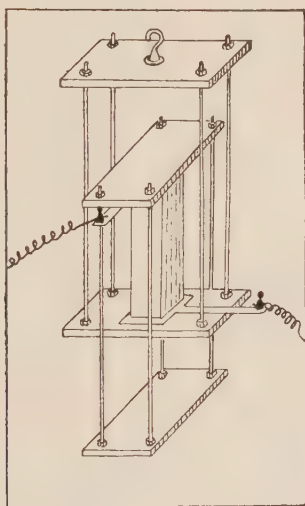


Fig. 7. — Montage de l'échantillon pour l'emploi des pressions variables.

des étriers et de l'échantillon est contenu dans une cage en bois à double paroi, dont les dimensions intérieures sont :  $20 \times 20 \times 60$  cm. (fig. 8). L'isolement thermique est obtenu à l'aide d'une couche de kapok située entre les deux parois et l'air est desséché par du chlorure de calcium contenu, à la base de la cage, dans une cuvette en plomb. Pour éviter l'action de l'humidité contenue dans le bois de la cage, celle-ci est doublée intérieurement de feuilles de zinc. L'expérience a montré que la dessiccation est suffisante

sans ventilation de l'air intérieur. Le passage, à travers la cage, des fils d'amenée du courant à l'éprouvette rocheuse, s'effectue dans deux doubles pipes en verre remplies de paraffine. Celle-ci étant abritée contre tout dépôt de poussières conserve intactes ses propriétés isolantes et l'isolement est le meilleur que l'on puisse avoir. L'expérience a montré, en effet, qu'au cours de trois années de mesures, aucune fuite n'a pu être décelée de ce côté.

Lorsque l'éprouvette rocheuse doit être chauffée, cet échauffement s'obtient en élevant lentement le bain d'air intérieur à la température désirée à l'aide de deux lampes à incandescence de 75 watts, situées dans la partie inférieure, et d'un rhéostat de réglage extérieur. Elle est lue sur un thermomètre situé à l'intérieur de la cage, aussi près que possible de l'échantillon, en face d'un orifice de visée, à double paroi, constitué par deux vitres parallèles. Sur les faces latérales de la cage se trouvent également deux hublots à double paroi destinés à l'éclairage de la cage et permettant de surveiller le maintien des dispositions respectives de l'appareillage.

Le serrage de la roche entre les étriers s'effectue à l'aide de la pression exercée par des masses connues. Cette pression est bien déterminée et permet, de plus, une parfaite reproductibilité des expériences. Une première méthode consiste à mettre des masses marquées sur un plateau situé à l'intérieur de la cage et suspendu à l'étrier inférieur. Elle présente le double inconvénient de nécessiter l'ouverture de la cage pour chaque changement de masse et de ne pas fournir des pressions supérieures à 12 kg./cm<sup>2</sup>. J'ai alors remplacé le plateau par un fléau de balance romaine situé sous la cage et dont le point fixe est lié, d'une façon invariable, au plancher. Ce fléau est accroché, en un point situé tout près de son pivot, à l'étrier inférieur et les pressions sont obtenues par simple déplacement d'une masse connue sur sa graduation, sans toucher aux autres parties du mon-

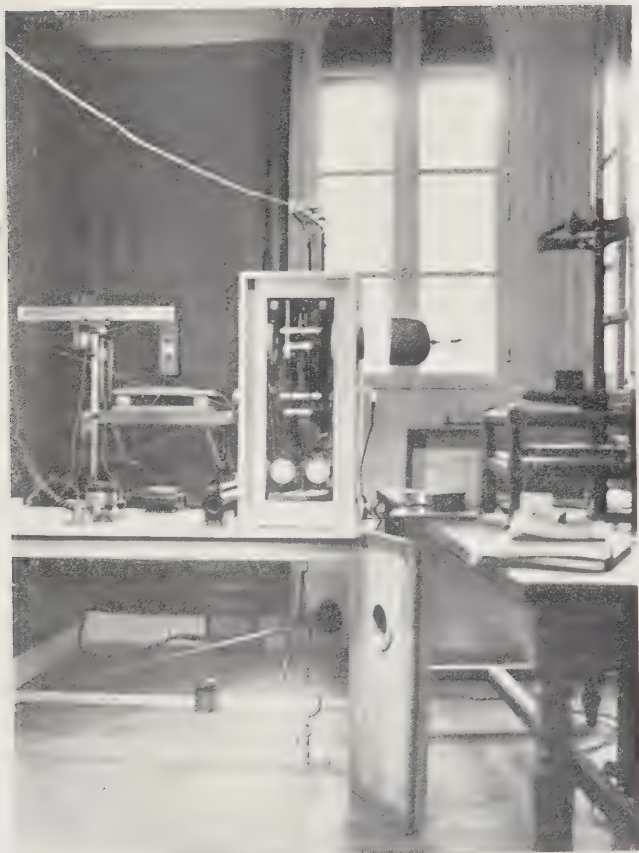


Fig. 8. — Montage à pressions variables.



tage. On peut ainsi obtenir des pressions variant de 1 à 150 kg./cm<sup>2</sup>. L'ensemble du montage est représenté sur la figure 8.

**Montage à pression constante.** — Le second montage, au contraire, est destiné à des mesures moins précises, nécessi-

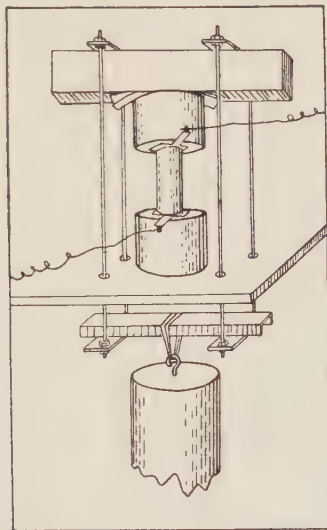


Fig. 9. — Montage de l'échantillon pour l'emploi d'une pression constante.

tant un montage rapide de l'échantillon et pour lequel les influences extérieures sont sans importance. Il peut servir, également, à l'étude de l'action de l'humidité de l'air sur la roche.

La roche est comprise entre un bloc de paraffine sur lequel elle est posée et une masse d'ébonite qui la surmonte. Une plaque métallique de grande surface sert d'intermédiaire entre la roche et le bloc de paraffine pour la répartition des pressions. Le serrage est dû à l'action exercée par

une masse de 25 kg. située sous la table ; cette pression est transmise par quatre tiges métalliques traversant la table sans la toucher et une brique de verre isolante. L'appareil est représenté sur la figure 9 et visible dans la figure 10. L'isolement est aussi bon que dans le cas précédent, mais la pression est beaucoup plus faible ( $25 \text{ kg./cm}^2$  pour une section de  $1 \text{ cm}^2$ ). Nous verrons cependant plus loin que, pour un grand nombre d'échantillons, on peut se contenter d'aussi faibles pressions.

**Précautions d'isolement.** — Les résistances mesurées sont, pour certaines roches, d'une grandeur considérable ( $10^{11}$  ohms) et il a fallu s'efforcer d'obtenir un isolement aussi bon que possible. Le circuit pouvant, dans certains cas, se fermer par la table, les murs ou le sol, il a été isolé au maximum de tous les objets extérieurs. Les fils torsadés ont été rejetés et j'ai eu recours aux fils simples, isolés et ayant le moins de points de suspension possible. Quand un point d'attache extérieur au circuit est nécessaire, il est toujours établi par l'intermédiaire d'isolants (blocs de paraffine, baguette de verre). J'ai utilisé également, afin d'éviter les fuites, un appareillage aussi réduit que possible ; tout cet appareillage, boîtes de résistance, accumulateurs, interrupteur, est isolé par des blocs de paraffine, ceux-ci étant changés fréquemment afin d'éviter les fuites dues à la détérioration de leur surface.

La figure 10 montre bien toutes ces caractéristiques du montage et le mode d'attache des fils de connexion.

Dans de telles conditions, l'expérience a montré que l'isolement est suffisant. L'intensité du courant dû aux fuites est, en effet, toujours inférieure à l'intensité minima que permet de déceler la sensibilité de la méthode employée dans le cours de ce travail.

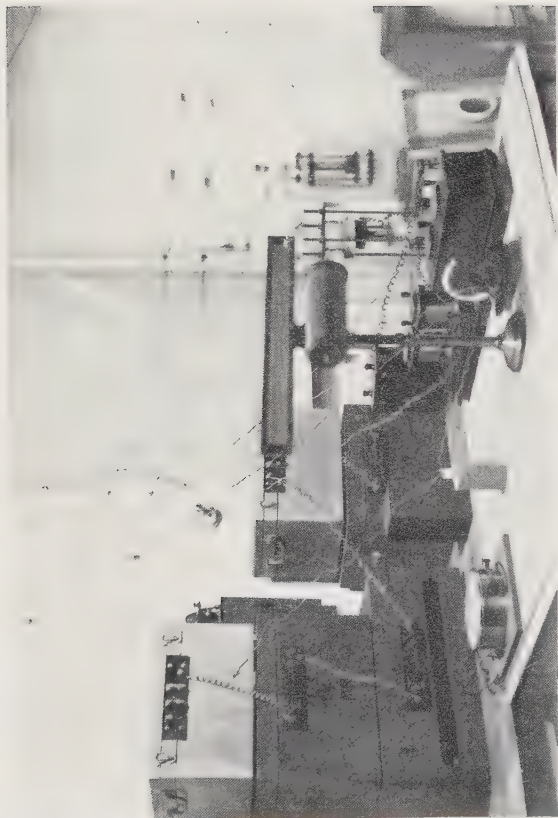


Fig. 10. — Montage à pressions constantes et isolement de fils.



**Nature des contacts.** — Le mode de mise en circuit des échantillons est une question primordiale dans une étude telle que celle-ci, et il est clair qu'il est extrêmement difficile d'obtenir un bon contact entre une électrode métallique et un corps à la fois non homogène et une texture très variable, tel qu'une roche. Dès que le contact n'est pas tout à fait intime entre l'électrode et l'extrémité de l'échantillon, il existe une très forte résistance de contact, de grandeur variable et qui peut masquer complètement les propriétés de la roche étudiée. L'élimination de cette résistance de contact a été longue et difficile et j'ai dû faire toute une série d'essais variés.

1) Les premiers échantillons étudiés sont des prismes rectangulaires dont les extrémités sont planes et présentent un beau poli. Ces éprouvettes ont été soumises à de faibles pressions, fournies par le montage à pressions variables sous sa première forme et n'excédant pas 12 kgs-cm<sup>2</sup>. De nombreux auteurs préconisant le serrage des échantillons entre deux coussinets de feuilles d'étain <sup>(1)</sup>, c'est ce mode de contact qui a été étudié en premier lieu. J'ai donc serré la roche entre deux électrodes formées de la superposition de 25 feuilles d'étain de 2/10<sup>e</sup> mm. Comme le montre la figure 11 (courbe I) les elongations du galvanomètre obtenues pour les différentes pressions, sont très variables, mais subissent un accroissement rapide. Cet accroissement montre l'existence d'une résistance de contact, qui diminue quand la pression croît, mais que de telles pressions sont impuissantes à faire disparaître. Avant d'avoir recours à de plus fortes pressions, j'ai essayé d'avoir des masses de contact plus malléables en employant de l'amalgame d'étain de 5/10 mm. Le résultat n'a pas été meilleur. La superposition d'une feuille d'étain de 4/100 mm. sur une feuille de liège de 5 mm., puis sur une ou plusieurs feuilles de caoutchouc

(1) *Loc. cit.*

de 5/10 mm. a donné des résultats un peu plus satisfaisants, en ce sens que la courbe donnant l'élongation du galvanomètre a une pente un peu moins forte (courbe II, fig. 11), faisant entrevoir que l'on se rapproche de la résistance vraie de la roche. C'est pourquoi, en conservant les masses de contact formées d'une feuille d'étain sur une feuille de

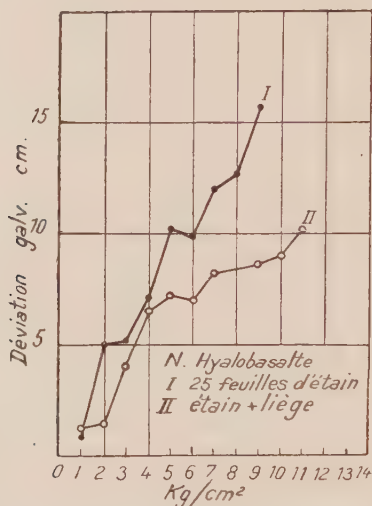


Fig. 11. — Etude des contacts.

caoutchouc, j'ai transformé l'appareil de façon à obtenir de plus fortes pressions. Dans ces conditions, on n'obtient pas de résultats nettement satisfaisants, puisque l'intensité du courant croît toujours lorsque la pression augmente, mais la courbe obtenue présente une courbure de plus en plus faible (fig. 12) qui aboutirait probablement à un palier pour de très fortes pressions. J'ai alors essayé d'intercaler d'autres métaux, deux feuilles d'argent ou d'or battu, entre l'étain et la roche et, parallèlement, j'ai modifié l'appareil de suspension par l'adjonction au câble d'un tendeur qui permet

d'obtenir des pressions encore supérieures aux précédentes. Dans ces conditions et avec des pressions égales au maximum à  $120 \text{ kgs/cm}^2$ , la courbe obtenue aboutit toujours à un palier qui correspond sans doute à la résistance vraie de l'échantillon ; le résultat est obtenu, quelle que soit la roche et en employant indifféremment comme contact intermé-

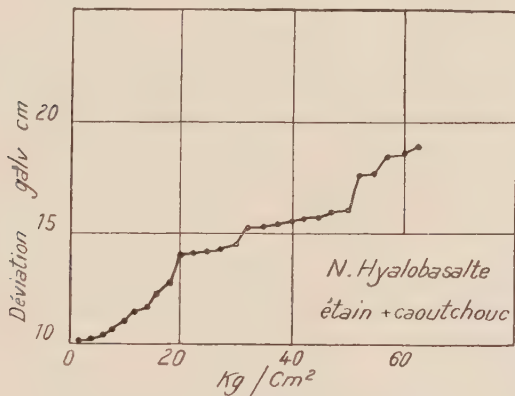


Fig. 12. — Etude des contacts.

diaire l'argent ou l'or battu. L'or étant beaucoup plus délicat à manier, l'argent lui a été préféré et c'est à lui que j'ai eu toujours recours dans la suite de ce travail. Le début du palier correspond à des pressions qui dépendent de la nature de la roche. Cette pression, que l'on peut qualifier de pression critique est, par exemple, très forte pour un basalte (courbe I, fig. 13), moyenne pour un granite (courbe II, fig. 13) et très faible pour une diorite (courbe III, fig. 13).

Pour chaque roche étudiée, il est donc nécessaire de la déterminer expérimentalement par la méthode à pressions croissantes qui vient d'être décrite. Cette pression critique étant fixée, on est assuré qu'en soumettant l'échantillon à une pression qui lui soit supérieure, on obtient des résultats

caractérisant la roche considérée et indépendants de toute erreur due au mauvais contact.

2) La deuxième série d'échantillons sur laquelle porte l'étude, est composée de fragments de carottes de sondage dont les extrémités ont reçu un poli optique. On pouvait supposer, en effet, qu'entre de telles surfaces, polies à moins

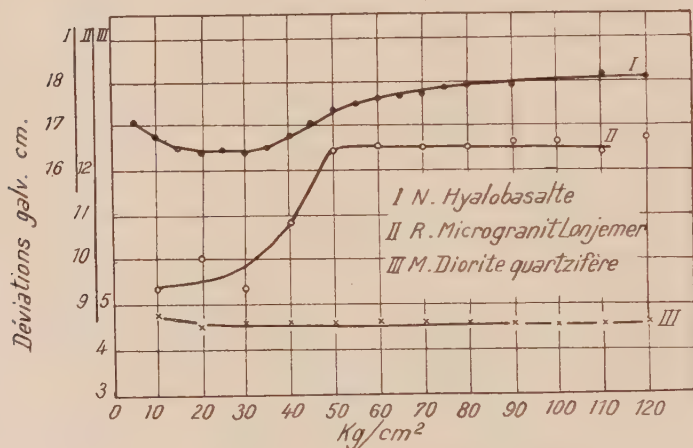


Fig. 13. — Recherche de la pression critique.

d'une frange près, et un métal malléable, un bon contact serait plus facile à obtenir. Cette condition est nécessaire, car les sections des carottes étant toujours de 4 à 5 cm², la pression par centimètre carré de surface est réduite d'autant et ne peut dépasser 30 kgs/cm². Les masses de contact employées sont celles qui ont donné le meilleur résultat dans l'étude précédente, c'est-à-dire l'argent battu sur de l'étain et du caoutchouc. On a pu reconnaître, par de nombreux essais que, dans ces conditions, les résultats obtenus sont indépendants de la pression (fig. 14). Avec de telles extrémités, la résistance de contact est éliminée, même pour de très faibles pressions, et cela est vrai quelle que soit la nature de la roche.

**Remarques.** — Sur les courbes données précédemment, on peut voir que, contrairement à l'hypothèse d'une résistance de contact diminuant avec le temps, il existe presque toujours un minimum d'intensité pour les faibles pressions. Nous verrons plus loin que cette particularité provient non pas des contacts, mais de la variation de la résistance avec la durée de passage du courant. On remarquera également

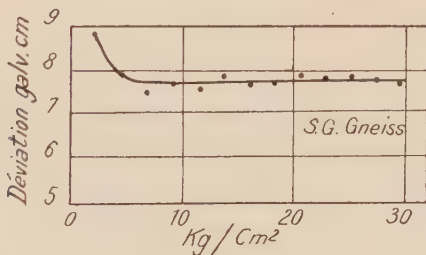


Fig. 14. — Courbe obtenue avec un poli optique.

que les résultats concernant une même roche paraissent contradictoires (fig. 11). La courbe II correspond, en effet, à une résistance plus grande que la courbe I. Or, la résistance obtenue dans le second cas se rapproche de la résistance vraie et devrait être, par suite, inférieure à celle que fournit la courbe I qui correspond à un très mauvais contact. Cela tient, comme on le verra plus loin à ce qu'il est impossible de travailler deux jours de suite sur une roche ayant conservé les mêmes propriétés. Toutes conditions apparentes étant les mêmes, il y a toujours une cause profonde de variation et la résistance n'est jamais conservée.

## CHAPITRE IV

### Résultats généraux.

**Résistivité initiale et résistivité vraie.** — La mesure de la résistivité électrique des roches consiste en la détermination de l'intensité du courant qui les traverse sous tension connue. Pour que les résultats obtenus aient un sens précis, il est nécessaire que cette intensité soit constante et bien déterminée pour chaque valeur de la différence de potentiel. Or, nous allons voir qu'elle est, en fait, éminemment variable et que, pour pouvoir obtenir des résultats comparables, il a fallu choisir une définition particulière de la résistivité, c'est-à-dire prendre pour l'intensité une valeur correspondant à des conditions bien définies. En effet, l'intensité varie avec le temps qui s'est écoulé depuis la fermeture du circuit; c'est une fonction décroissante du temps. Cette décroissance, qui est très rapide pendant les premiers instants, s'atténue rapidement et devient très faible au bout d'un temps qui varie selon les échantillons, mais reste toujours relativement grand. Elle ne paraît pas devoir jamais s'annuler et il semble, d'après les expériences qui ont été faites, que l'on ne puisse pas obtenir, pour une différence de potentiel déterminée, une intensité qui soit réellement constante. Ces expériences ne peuvent malheureusement durer plus de quelques heures, car au phénomène étudié vient alors s'ajouter celui de la variation lente de la résistance de la roche qui peut, soit augmenter l'effet dû au passage du courant, soit au contraire l'annuler. Cette variation lente, que j'ana-

lyserai plus loin est due à un certain nombre de causes dont certaines seulement sont connues (humidité, température) et dont on ne peut, en général, éviter complètement l'action. Il est néanmoins toujours permis de supposer que, si ces actions extérieures étaient supprimées, l'expérience pourrait durer un temps illimité et qu'au bout de ce temps l'intensité deviendrait constante. A cette intensité à la limite correspond une résistivité théorique que j'appellerai résistivité vraie de la roche à l'instant considéré. C'est cette résistivité vraie qui est considérée comme caractéristique de

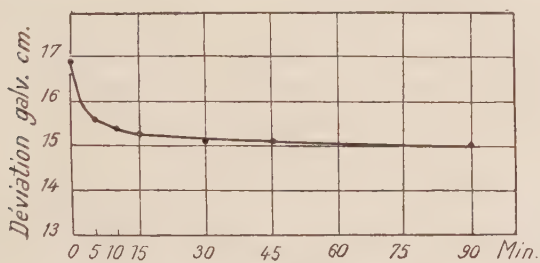


Fig. 15. — Variation initiale de la conductibilité.

l'échantillon et le résultat à obtenir sera donc d'en trouver une valeur aussi approchée que possible.

Examinons maintenant les particularités de ces premiers instants de passage du courant. Les premiers mouvements du galvanomètre consistent en plusieurs oscillations rapidement amorties et j'appellerai élongation initiale, la moyenne entre les deux premières oscillations dont les amplitudes ne diffèrent que de 2 mm. A cette élongation initiale, obtenue au bout de 10 secondes, correspondent l'intensité initiale et la résistivité initiale. J'appellerai de même intensité d'équilibre une intensité telle que la résistivité qu'elle fournit s'écarte de la résistivité vraie d'une quantité inférieure à une limite choisie *a priori*. Un exemple montrera clairement ce processus de variation. Considérons la roche N (hyalobasalte

du Vicentin) étudiée sous 40 volts et dont la courbe a été suivie pendant 1 heure 30 minutes. L'intensité décroît très rapidement pendant les 15 premières minutes, un peu moins vite pendant les 15 minutes qui suivent et cette variation devient pratiquement constante et très faible pendant le reste de l'expérience (fig. 15). Si on appelle intensité d'équilibre, celle qu'on lit au bout d'un intervalle de 1 h. 30 min., on pourra calculer les variations d'intensité pendant des durées déterminées, ainsi que les variations relatives par rapport à l'intensité d'équilibre correspondant à des temps égaux. Le tableau I montre la variation de ces grandeurs relatives. L'intensité étant proportionnelle aux elongations du galvanomètre, il revient au même de faire porter l'étude sur ces elongations elles-mêmes.

TABLEAU I

| Temps écoulé-minutes . . .                            | 0    | 5    | 10   | 15   | 30    | 45    | 90 |
|-------------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|----|
| Elongations correspondantes .                         | 16,9 | 15,6 | 15,4 | 15,3 | 15,15 | 15,1  | 15 |
| Variation absolue . . . . .                           | 1,3  | 0,2  | 0,1  | 0,15 | 0,05  | 0,1   |    |
| $\varepsilon$ : Variation absolue en 5 min. .         | 1,3  | 0,2  | 0,1  | 0,05 | 0,016 | 0,011 |    |
| Variation relative $\frac{\varepsilon}{15}$ o/o . . . | 8,70 | 1,30 | 0,67 | 0,33 | 0,11  | 0,07  |    |

Comme on le voit, la variation n'est très importante que pendant les tout premiers instants et elle devient très faible au bout de 30 minutes. Si donc on prend comme résistivité de la roche celle que l'on obtient au bout de 30 minutes, on peut espérer que la valeur obtenue ne diffère de la résistivité vraie que d'une quantité inférieure à 10 o/o de cette valeur.

Or, nous verrons plus loin que dans une étude telle que celle-ci, on peut se déclarer satisfait des mesures pour lesquelles l'insécurité ne dépasse pas 10 o/o.

**Phénomène d'Hystérésis.** — Si une fois l'équilibre atteint, on interrompt le courant pendant 5 minutes, aux essais immédiats qui suivent, la variation ne se reproduit pas. L'élongation d'équilibre reste la même et elle est acquise immédiatement. L'intensité continue à diminuer lentement, mais elle ne diminue que dans des proportions assez faibles pour que l'on puisse considérer l'équilibre comme atteint. Il semble donc que, dans ce cas, le premier passage du courant crée une transformation profonde de la roche et que le deuxième ne puisse agir comme un courant initial. Ceci a lieu, même si l'interruption de courant est accompagnée de variation de la tension, c'est-à-dire si le deuxième courant correspond à une différence de potentiel différente de la première. L'élongation change, évidemment, mais ce que j'ai appelé précédemment variation initiale n'existe plus. L'intensité d'équilibre est atteinte immédiatement et la variation est plus faible que la limite désirée.

**Application aux mesures.** — Quel que soit le phénomène que l'on étudie, influence de la température, influence de la différence de potentiel, influence de l'humidité, il sera seulement nécessaire de rechercher la résistivité d'équilibre pour le premier courant qui traverse la roche.

Le critérium d'équilibre est le suivant : on attend jusqu'à ce que, pendant deux intervalles successifs de 5 minutes, la variation de l'élongation reste inférieure ou au plus égale à 1 mm. Ceci correspond, pour les élongations moyennes à une variation relative comprise entre 0,5 o/o et 2 o/o. Nous avons vu précédemment qu'en un tel point, la résistivité obtenue était suffisamment rapprochée de la résistivité vraie.

Ce critérium n'est applicable que pour les élongations

supérieures à 5 cm. Pour de très faibles élongations, on attend jusqu'à ce que, pendant deux intervalles de 5 minutes, la variation de l'élongation reste inférieure à 0 mm. 5. Dans ces conditions, on obtient une précision à peu près équivalente à la précédente. Les résistivités données dans le cours de ce travail sont toujours des valeurs obtenues par l'un des deux procédés précédents. On ne peut affirmer, *a priori*, que ce soient là les résistivités vraies des roches, car il n'y a pas plus lieu de choisir pour cette grandeur la résistivité initiale que la résistivité d'équilibre. Pour un corps dont une propriété est variable, on ne peut donner aucun nombre vraiment caractéristique de cette propriété. Ce qui a guidé mon choix, c'est la nécessité de posséder une valeur de la résistance, obtenue dans des conditions reproductibles, et susceptible de pouvoir définir la roche dans des états variables.

**Variation lente.** — Je définirai tout d'abord ce que, dans la suite de ce travail, j'appellerai « l'état naturel » de l'échantillon. Cet « état naturel » est celui d'échantillons provenant de morceaux de roches extraits depuis un certain nombre de mois et qui ont été taillés depuis plusieurs semaines. Ces échantillons, conservés depuis leur taille dans une vitrine en communication avec l'air ambiant n'ont subi aucune préparation spéciale, d'où le terme de « naturel » qui définit leur état en opposition avec deux états artificiels de l'échantillon, état parfaitement sec et état parfaitement humide, qui seront étudiés plus loin.

Un tel échantillon, s'il a acquis une certaine humidité lors de la taille, l'a perdue depuis et d'un jour à l'autre, il semblerait devoir rester semblable à lui-même. Or, il n'en est rien et la résistivité déterminée comme il a été dit précédemment varie avec le temps. Si l'on considère un même échantillon dans des conditions extérieures semblables, entre les mêmes électrodes, sa résistivité varie d'un jour à l'autre et

même, parfois, dans le cours d'une même journée. Cette résistivité peut varier dans de larges limites, dans certains cas du simple au décuple et même exceptionnellement du simple au centuple. Citons, par exemple, la roche N hyalo-basalte du Vicentin étudiée à onze reprises dans un intervalle de presque un mois. Elle a donné les résultats suivants :

TABLEAU II

| Date      | Tension | Résistivité |
|-----------|---------|-------------|
| 20-1-1933 | 40 v.   | 4,2 $10^7$  |
| 21-1-1933 | »       | 4,2 »       |
| 23-1-1933 | »       | 4,6 »       |
| 24-1-1933 | »       | 4,0 »       |
| 27-1-1933 | »       | 3,1 »       |
| 15-2-1933 | »       | 3,9 »       |
| 16-2-1933 | »       | 4,2 »       |
| 17-2-1933 | »       | 5,6 »       |
| 20-2-1933 | »       | 7,6 »       |
| 21-2-1933 | »       | 9,3 »       |
| 24-2-1933 | »       | 7,2 »       |

Entre deux mesures successives la roche était conservée, soit dans son montage la porte de la cage étant ouverte, soit dans une vitrine. Les contacts, ainsi que la différence de potentiel ont été les mêmes et la résistivité a néanmoins varié du simple au triple de 3, 1.  $10^7$  à 9, 3.  $10^7$  ohms. Pour un échantillon à l'état « naturel », ces variations sont dues, semble-t-il à un changement dans l'état de siccité de la roche, causée d'une part par l'échauffement dû au passage du courant et, d'autre part, par le degré d'humidité de l'air ambiant. Il est difficile d'éliminer entièrement ces causes de variations qui, peut-être, ne sont pas les seules causes agissantes, et il faut se contenter de l'échantillon dans l'état où il se trouve. Dans de telles conditions, on ne pourra jamais parler, pour une roche à l'état « naturel », de résistivité caractéristique,

On peut tout juste donner, pour chaque état déterminé, mais mal connu, une résistance correspondante et la moyenne de toutes les valeurs trouvées correspond alors à la roche, dans un état moyen qui n'est pas le même d'une roche à l'autre.

### Valeurs numériques de la résistivité électrique des roches.

— Le tableau suivant donne les valeurs numériques des résistivités de roches étudiées dans ce travail, auxquelles il faut donner la signification décrite plus haut.

On peut ajouter à cela que l'état « naturel » des échantillons est très différent de celui des roches dans le sol. Les roches de la croûte terrestre sont, en effet, dans un état de température, de pression et d'humidité que l'extraction modifie certainement. Les valeurs trouvées pour la conductibilité électrique d'un échantillon à l'état « naturel » ne peuvent donc caractériser la roche dans son gisement. Les roches dans leur état de gisement sont presque inaccessibles ; il faut se contenter, en général, des échantillons conservés en laboratoire et ayant, par suite, subi l'influence des conditions extérieures. Il m'a cependant été permis de mesurer les résistivités de quelques échantillons conservés, depuis leur extraction, dans des conditions telles que leur eau d'imbibition s'évapore le moins possible. Les nombres trouvés pour ceux-ci possèdent donc, au point de vue terrestre, une valeur supérieure à celles des nombres que fournissent des échantillons conservés depuis longtemps à l'air libre.

Il a donc, par suite, paru intéressant de poursuivre l'étude de l'influence sur la conductibilité électrique des roches, de divers facteurs tels que la différence de potentiel, la température et l'humidité, ainsi que la recherche de la nature de la conductibilité. Ce genre de travaux paraît devoir fournir des résultats plus précis et caractériser d'une bien meilleure façon la résistivité électrique des roches naturelles.

TABLEAU III

*Valeur des résistivités électriques des roches.*

| Echan-<br>tillon | Nature                 | Origine                       | Valeurs extrêmes<br>mesurées |                     |                |                     |
|------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------|---------------------|
|                  |                        |                               | Poten-<br>tiel               | Résis-<br>tivité    | Poten-<br>tiel | Résis-<br>tivité    |
| S. E. 1          | Granite                | Eygurande                     |                              |                     | 600            | $7,1 \cdot 10^9$    |
| S. E. 2          | »                      | »                             | 240                          | $8,4 \cdot 10^8$    | 120            | $3,0 \cdot 10^9$    |
| E. R. 278        | »                      | Vallée de l'Esla<br>(Espagne) | 40                           | $3,9 \cdot 10^7$    | 120            | $2,1 \cdot 10^8$    |
| E. R. 279        | »                      | »                             | 600                          | $1,2 \cdot 10^7$    | 120            | $4,9 \cdot 10^7$    |
| E. R. 289        | »                      | »                             | 600                          | $1,6 \cdot 10^7$    | 120            | $4,3 \cdot 10^7$    |
| E. R. 285        | »                      | »                             | 120                          | $2,2 \cdot 10^7$    | 240            | $3,3 \cdot 10^9$    |
| R.               | Microgranite           | Longemer                      | 200                          | $3,2 \cdot 10^8$    | 40             | $8,0 \cdot 10^8$    |
| P. M. B. 1       | Protogine              | Massif du Mt Blanc            | 600                          | $5,5 \cdot 10^8$    | 600            | $5,2 \cdot 10^{10}$ |
| P. M. B. 2       | »                      | »                             | 600                          | $1,5 \cdot 10^9$    | 600            | $6,5 \cdot 10^{10}$ |
| G.               | Obsidienne             | Airan (Ecosse)                | 600                          | $1,8 \cdot 10^{10}$ | 240            | $3,0 \cdot 10^{10}$ |
| A. P.            | Porphyre               | Arudy                         |                              |                     | 360            | $5,7 \cdot 10^7$    |
| M.               | Diorite<br>quartzifère | Limonest (Rhône)              | 40                           | $1,4 \cdot 10^8$    | 40             | $3,6 \cdot 10^8$    |
| B. C. 1          | Balsate                | Carlat (Cantal)               |                              |                     | 600            | $1,5 \cdot 10^7$    |
| B. C. 2          | »                      | »                             | 600                          | $1,5 \cdot 10^7$    | 600            | $2,0 \cdot 10^7$    |
| N.               | Hyalobasalte           | Vicentin                      | 40                           | $3,6 \cdot 10^7$    | 40             | $9,2 \cdot 10^7$    |
| P. J.            | Phonolite              | Jou-sous-Montjou<br>(Cantal)  | 600                          | $2,3 \cdot 10^7$    | 120            | $1,3 \cdot 10^8$    |
| D. L.            | Labradorite            |                               | 320                          | $6,9 \cdot 10^8$    | 400            | $1,2 \cdot 10^7$    |
| S. M. 1          | Marne                  | Mines de Murville             |                              |                     | 0,4            | $5,2 \cdot 10^6$    |
| S. M. 2          | »                      | »                             |                              |                     | 600            | $8,7 \cdot 10^5$    |
| I. F. 9          | Grès                   |                               | 600                          | $3,3 \cdot 10^6$    | 120            | $2,9 \cdot 10^9$    |
| I. F. 18         | »                      |                               |                              |                     | 600            | $6,0 \cdot 10^5$    |
| I. F. 7. 24      | »                      |                               |                              |                     | 600            | $5,1 \cdot 10^6$    |
| I. F. 7. 17. 5   | Schiste                |                               | 600                          | $4,1 \cdot 10^8$    | 40             | $2,0 \cdot 10^7$    |
| R. S. 1          | Schiste calcaire       | Barr. Doiras.                 |                              |                     |                |                     |
|                  |                        | Rio Navia                     | 600                          | $2,1 \cdot 10^7$    | 120            | $5,6 \cdot 10^8$    |
| R. D.            | Calcaire               | Gorges du Sautet,<br>Drac     |                              |                     | 40             | $1,8 \cdot 10^6$    |
| P. S. M.         | Calcaire<br>jurassique | La Roque<br>Ste Marguerite    | 600                          | $1,9 \cdot 10^6$    | 120            | $1,1 \cdot 10^7$    |
| S. A.            | Arkose                 |                               | 40                           | $1,8 \cdot 10^7$    | 120            | $2,4 \cdot 10^9$    |
| G. C.            | Marbre blanc           | Carrare                       |                              |                     | 600            | $7,8 \cdot 10^9$    |
| A. M. S. 1       | Marbre                 | Arudy                         |                              |                     | 120            | $4,4 \cdot 10^8$    |
|                  | Ste-Anne Clair         |                               |                              |                     |                |                     |
| A. M. P.         | Portor d'Italie        | La Spezia. Gênes              |                              |                     | 120            | $1,0 \cdot 10^9$    |
| A. M. J.         | Marbre jaune           | Var                           |                              |                     | 600            | $2,6 \cdot 10^{10}$ |
| A. M. B.         | Brèche violette        | St Sébastien                  |                              |                     | 120            | $8,6 \cdot 10^7$    |
| S. G.            | Gneiss                 |                               | 600                          | $1,7 \cdot 10^8$    | 120            | $6,8 \cdot 10^8$    |
| P. D. 2. A.      | Schiste                |                               | 600                          | $5,8 \cdot 10^6$    | 120            | $5,2 \cdot 10^7$    |
|                  | à sérécite //          |                               |                              |                     |                |                     |
| P. D. 2. B.      | Schiste                |                               | 600                          | $7,1 \cdot 10^6$    | 120            | $3,2 \cdot 10^9$    |
|                  | à sérécite I.          |                               |                              |                     |                |                     |

## CHAPITRE V

### Variation avec la différence de potentiel.

**Méthode.** — Un certain nombre de roches ont été étudiées au point de vue de la variation de leur résistance déduite de la formule d'Ohm, en fonction de la tension à laquelle elles sont soumises. Celle-ci varie, en général, par étapes de 40 volts entre 40 et 600 volts.

Les valeurs des résistivités correspondant à chaque tension sont les résistivités d'équilibre définies précédemment.

Une série de mesures à différences de potentiels croissantes est généralement suivie de quelques mesures à tensions décroissantes revenant au point de départ et permettant de contrôler la constance des résultats et la réalité du phénomène. Ces mesures sous tensions décroissantes fournissent des résultats voisins de ceux que l'on obtient sous tensions croissantes. Quel que soit le type de la variation, les intensités sous tensions décroissantes sont, pour une même différence de potentiel, inférieures aux intensités sous tensions croissantes. Les différences entre ces deux intensités sous une tension donnée sont inférieures aux erreurs tolérées dans ce travail (10 0/0) et peuvent être considérées comme ayant les deux causes suivantes :

1<sup>o</sup> Dessiccation de la roche pendant la durée de l'expérience (2 heures au minimum).

2<sup>o</sup> Décroissance lente de l'intensité avec la durée de passage du courant.

Elles sont d'autant plus faibles que l'expérience est plus courte et comporte moins de points intermédiaires entre les

deux tensions extrêmes, ce qui paraît vérifier l'hypothèse précédente. On peut donc affirmer que le phénomène est réversible et correspond à une propriété caractéristique de l'échantillon.

**Types de variation.** — D'après ce que nous avons vu, dans l'introduction, les semi-conducteurs étudiés à ce point de vue, présentent en général une décroissance de la résistance lorsque la différence de potentiel croît. On aurait pu s'attendre, pour les roches naturelles, à un phénomène de même nature. Nous allons voir qu'il n'en est pas toujours ainsi et que, même lorsque cette loi est vérifiée, il peut s'agir de types de variation nettement différents. Considérons, pour cela, la courbe représentant la variation de l'intensité du courant qui traverse l'échantillon, en fonction de la tension à laquelle il est soumis. Pour les corps à résistivité constante, une telle courbe est une droite passant par l'origine et ayant pour pente la conductibilité du corps. Si la résistance est variable suivant la valeur de la tension, la pente de la courbe est variable et nous aurons affaire à une courbe concave ou convexe vers le bas, suivant que la résistance est fonction croissante ou décroissante de la tension. De plus, selon qu'il existera ou non un phénomène de polarisation de l'échantillon, la courbe ne passera pas ou passera par l'origine.

Les considérations précédentes permettent donc de classer les roches en trois catégories principales, au point de vue de la variation de leur résistance avec la tension à laquelle elles sont soumises. Ces trois types sont les suivants :

*Type I.* — La courbe représentant l'intensité est concave vers le haut et ne passe pas par l'origine. Elle coupe l'axe des différences de potentiels en un point correspondant à une abscisse positive  $v$  (courbe I, fig. 16). Les roches de ce type sont des roches à résistivité constamment décroissante, cette décroissance étant beaucoup plus rapide pour les faibles

valeurs de la tension (courbe I, fig. 17). La décroissance totale varie selon les roches, mais elle est, en général, assez forte.

*Type II.* — La courbe représentant l'intensité est une droite qui ne passe pas par l'origine. Elle coupe l'axe des

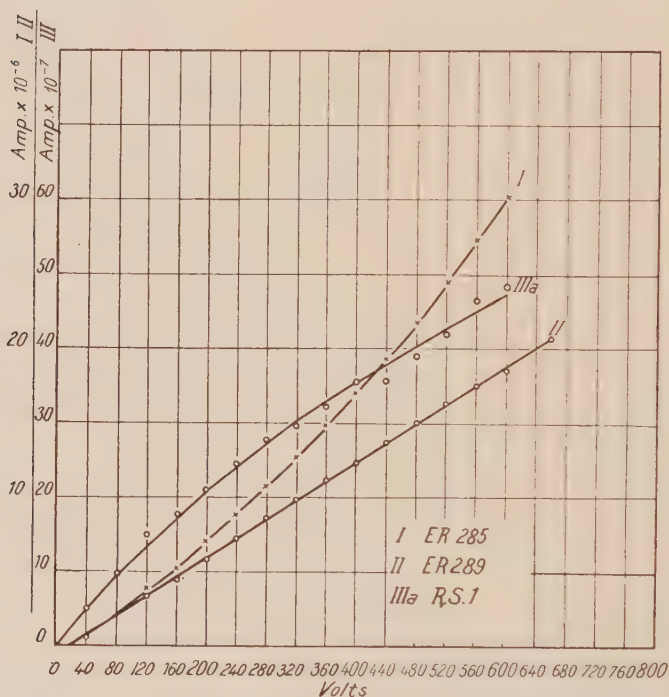


Fig. 16. — Variation de la conductibilité avec la tension.

différences de potentiels en un point correspondant à une abscisse positive  $w$  (courbe II, fig. 16). Les roches de ce type sont des roches à résistivité décroissante, cette décroissance étant plus rapide pour les faibles différences de potentiels mais leur résistivité paraît devoir atteindre une valeur constante pour les valeurs élevées de la tension (courbe II,

fig. 17). En général, la décroissance totale de la résistivité paraît moindre que celle des roches du type I.

*Type III.* — La courbe représentant l'intensité est convexe vers le haut et passe par l'origine (courbe III<sup>a</sup>, fig. 16). Les

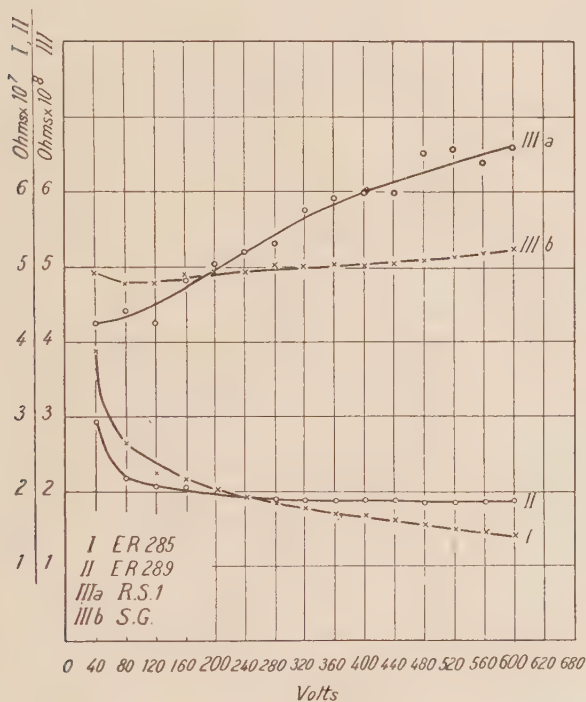


Fig. 17. — Variation de la résistance avec la tension.

roches de ce type présentent une résistivité croissante avec la différence de potentiel. Cette croissance est en général faible et, dans certains cas, elle est si minime que l'on peut considérer que la résistance correspondante est constante, aux erreurs expérimentales près (courbes III<sup>a</sup>, et III<sup>b</sup>, fig. 17).

Le tableau suivant montre les rapports entre les résistivi-

tés correspondant aux valeurs extrêmes du potentiel. On remarque que ces rapports décroissent constamment lorsque l'on va du type I au type III.

TABLEAU IV

| Type | Roche     |                  |                     | Résistivité<br>à 40 v. | Résistivité<br>à 600 v. | $\frac{R_{40}}{R_{600}}$ |
|------|-----------|------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
|      | Numéro    | Nature           | Origine             |                        |                         |                          |
| I    | E. R. 285 | Granit           | Esla (Espagne)      | 3,85 10 <sup>7</sup>   | 1,39 10 <sup>7</sup>    | 2,77                     |
| II   | E. R. 289 | Granit           | Esla (Espagne)      | 2,93 10 <sup>7</sup>   | 1,88 10 <sup>7</sup>    | 1,56                     |
| III  | S. G.     | Gneiss           |                     | 4,92 10 <sup>8</sup>   | 5,23 10 <sup>8</sup>    | 0,94                     |
| III  | R. S. 1   | Schiste calcaire | Rio-Navia (Espagne) | 4,25 10 <sup>8</sup>   | 6,60 10 <sup>8</sup>    | 0,64                     |

On peut joindre à ce tableau un résultat intéressant concernant la roche N (hyalobasalte du Vicentin) qui, en considération de sa faible résistance aux basses tensions, a pu être étudiée sous des tensions très faibles (de 2 à 40 volts). Cette roche appartient au premier type, avec un coefficient d'affaiblissement de la résistance particulièrement fort, ainsi que l'indiquent les nombres suivants :

|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Résistance sous 2 volts . . . . | 5,07 10 <sup>8</sup>        |
| Résistance sous 40 volts. . . . | 3,1 10 <sup>7</sup>         |
| Rapport des résistances. . . .  | $\frac{R_2}{R_{40}} = 16,4$ |

On peut se demander si toutes les roches ne présentent pas une telle décroissance de la résistance au voisinage de l'origine. Si l'on considère, en effet, les courbes d'intensité correspondant aux roches du troisième type, on peut y discerner, pour les premières valeurs de la tension, une légère décroissance qui est, peut-être, l'aboutissement d'une décroissance plus rapide qui se produirait pour des valeurs plus faibles de la tension.

**Discussion.** — D'après ce que nous venons de voir, il est difficile de trouver une loi de variation unique de la résistivité électrique d'une roche en fonction de la différence de potentiel à laquelle elle est soumise. Le phénomène est, en effet, variable selon les échantillons (types I et II) et parfois même se présente d'une façon absolument opposée (type III). Les hypothèses les plus simples que l'on puisse faire pour tenter d'expliquer ces variations sont les suivantes :

1<sup>o</sup> Polarisation de l'échantillon.

2<sup>o</sup> Échauffement de la roche par le passage du courant.

Remarquons d'abord que les résistances des roches augmentent lorsque l'on va du type I au type III. Il en résulte qu'à égalité de tension, le courant qui circule à travers un échantillon du type I est plus grand que celui qui parcourt les types II ou III. Pour une tension donnée, l'énergie dissipée par le passage du courant qui est proportionnelle à l'intensité et, par suite, l'échauffement diminuent du type I au type III. C'est ce que montre le calcul suivant :

L'énergie dissipée dans 1 cm<sup>3</sup> de l'échantillon en 1 minute est représentable par :

$$W = 60 E.I$$

et la quantité de chaleur dégagée est égale à :

$$q = \frac{W}{J} = \frac{60 E.I}{J} .$$

On peut admettre, d'autre part, que toutes les roches étudiées possèdent la même chaleur spécifique  $c$  et la même densité  $d$ . Par suite, la capacité calorifique de 1 cm<sup>3</sup> de l'échantillon sera :  $C = c.d$  et l'élévation de température correspondante peut s'écrire :

$$\theta = \frac{Q}{C} = \frac{60 E.I}{Jcd} .$$

Le calcul a été fait pour les deux tensions extrêmes, 40 volts et 600 volts, en prenant les valeurs :

$$J = 4,18, \quad C = 0,2, \quad d = 2,5.$$

Il donne les résultats suivants :

| Echantillon | Type | 40 volts               |                     | 600 volts              |                     |
|-------------|------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
|             |      | Energie dissipée watts | Echauffement degrés | Energie dissipée watts | Echauffement degrés |
| E. R. 285   | I    | $1,2 \cdot 10^{-3}$    | $5,7 \cdot 10^{-4}$ | 0,76                   | 0,36                |
| E. R. 289   | II   | $1,1 \cdot 10^{-3}$    | $5,3 \cdot 10^{-4}$ | 0,39                   | 0,19                |
| R. S. I     | III  | $6,0 \cdot 10^{-5}$    | $2,9 \cdot 10^{-5}$ | $9,2 \cdot 10^{-3}$    | $4,4 \cdot 10^{-3}$ |
| S. G.       | III  | $3,6 \cdot 10^{-5}$    | $1,7 \cdot 10^{-5}$ | $7,3 \cdot 10^{-3}$    | $3,5 \cdot 10^{-3}$ |

L'échauffement croît avec la tension, en restant toujours faible. Il se produit de plus un constant échange de chaleur avec l'air ambiant qui se maintient à température constante. L'action de ces échanges est de réduire l'échauffement produit par le passage du courant, et l'échauffement réel est donc, par suite, plus faible que l'échauffement calculé.

L'élévation de température est déjà peu importante pour les échantillons du type I; elle s'affaiblit pour ceux du deuxième type et devient négligeable pour les autres. On peut donc admettre qu'elle ne joue un rôle véritable que pour les roches du type I. Pour les autres types, on ne peut conserver que l'hypothèse de la polarisation.

Une polarisation constante de l'échantillon paraît être la seule explication possible d'une variation semblable à celle du type II. Supposons, en effet, l'existence d'une force contre-électromotrice de polarisation constante  $v$  et écrivons la loi d'ohm pour un tel circuit. On obtient :

$$i = \frac{E - v}{R},$$

R étant la résistance vraie de l'échantillon.

La résistance apparente de l'échantillon s'exprime alors par :

$$R' = R \frac{E}{E - v} .$$

La courbe représentant l'intensité est une droite de pente  $\frac{I}{R}$  ne passant pas par l'origine et coupant l'axe des abscisses pour  $E = v$ . La résistivité est une fonction hyperbolique de la tension, à asymptote verticale d'abscisse  $v$ . Les résultats expérimentaux vérifient parfaitement cette hypothèse. Considérons, en effet, la courbe II (fig. 16). La considération de ses caractéristiques (pente, abscisse à l'origine) donne :

$$v = 15,5 \text{ volts.}$$

$$R = 1,81 \cdot 10^7 \text{ ohms/cm}^3.$$

On peut donc représenter la résistivité apparente de la roche par :

$$R' = 1,81 \cdot 10^7 \frac{E}{E - 15,5} .$$

Cette relation définit parfaitement la résistivité apparente dans l'intervalle de tensions considéré, ainsi que le montre la superposition des courbes théorique et expérimentale (fig. 18).

Dans un certain nombre de cas, l'expérience a pu montrer une polarisation de la roche. La fermeture de l'échantillon sur un galvanomètre, dès l'instant de la cessation de passage du courant  $a$ , en effet, causé une petite déviation du spot, déviation qui n'a jamais pu être déterminée exactement, mais qui semble correspondre à une force contre-électromotrice de quelques volts.

Si l'explication d'une variation du type II est simple, il n'en est pas de même pour les types I et III où les phénomènes sont plus compliqués. On peut tenter de les expliquer de la façon suivante, en supposant que les deux seules causes

susceptibles d'agir sont la polarisation et l'échauffement dû au passage du courant.

Comme je l'ai dit, l'échauffement dû au courant ne peut être effectif que pour les roches du premier type. Celui-ci correspondrait alors à la superposition de cet échauffement à un phénomène de polarisation constante. Comme on le

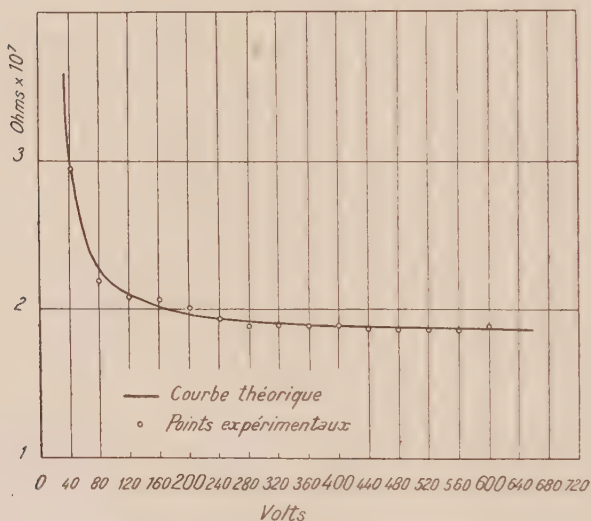


Fig. 18. — Resistivités correspondant à une polarisation constante.

verra, l'augmentation de température de l'échantillon cause une diminution de sa résistivité, diminution exponentielle qui viendrait alors s'ajouter à la décroissance hyperbolique due à la polarisation constante. L'effet obtenu serait alors bien une décroissance très rapide de la résistivité en fonction de la tension, telle que la représente la courbe I (fig. 17).

Dans l'hypothèse précédente, la seule explication possible d'une variation du type III est la polarisation de l'échantillon.

Mais une polarisation constante ne correspond pas au phénomène réel et il faut imaginer une polarisation variable, croissante avec la différence de potentiel.

On ne peut, en fait, considérer ces deux derniers essais d'explication que comme des hypothèses difficilement vérifiables et l'on est tenté de se rallier à l'opinion de Seeliger <sup>(1)</sup> et d'admettre qu'il est vain de tenter de ramener la loi du passage du courant à travers une roche à la loi d'Ohm. De telles explications peuvent n'être, en effet, que des artifices de calcul et masquer un phénomène plus profond, inhérent à la matière elle-même.

De toutes façons, on voit que la variation de la résistance avec la tension s'atténue lorsque celle-ci croît. Il est probable que, pour des tensions élevées, la résistivité serait suffisamment constante. Il y a donc intérêt à effectuer les mesures à l'aide de différences de potentiel aussi élevées que possible et la résistivité obtenue dans ces conditions doit caractériser d'une façon suffisante, l'échantillon à l'état où il se trouve.

(1) Chapitre premier, p. 13.

---

## CHAPITRE VI

### Action de la température.

**Méthode.** — L'échantillon serré à la pression suffisante entre les deux étriers est contenu dans la cage hermétiquement fermée. L'échauffement de la roche s'effectue par la méthode indiquée précédemment <sup>(1)</sup>. Comme il a été dit, la valeur de la résistivité à la température ambiante est celle que l'on obtient lorsque la première élongation du galvanomètre a atteint sa valeur d'équilibre. Les valeurs suivantes de la résistivité sont obtenues après une minute de passage du courant, celui-ci ayant été interrompu pendant 4 minutes entre deux mesures successives. Ces valeurs sont des valeurs d'équilibre et peuvent être considérées comme ayant été obtenues dans des conditions semblables.

**Echelle de température.** — La température varie, dans le cours des expériences, de la température ambiante à 52° environ. La température supérieure a été limitée par la nature du matériel qui n'aurait pu supporter des températures plus élevées (fusion des isolants, déformations sous l'effet de la pression de l'ensemble des étriers). Il n'a pas été jugé nécessaire de modifier l'appareillage, car un tel intervalle de température est suffisant au point de vue géophysique qui peut nous intéresser. Si l'on considère, en effet, un degré géothermique compris entre 25 et 30 m., l'étude des roches entre 15° et 52° correspond, dans le sol, à

(1) Chapitre III, p. 30.

des profondeurs pouvant atteindre 1 000 m. Or, les méthodes géophysiques, qu'il s'agisse de prospection ou de sondages, dépassent rarement de telles profondeurs.

**Phénomène général. Effet apparent.** — D'une façon générale la conductibilité augmente considérablement lorsque la

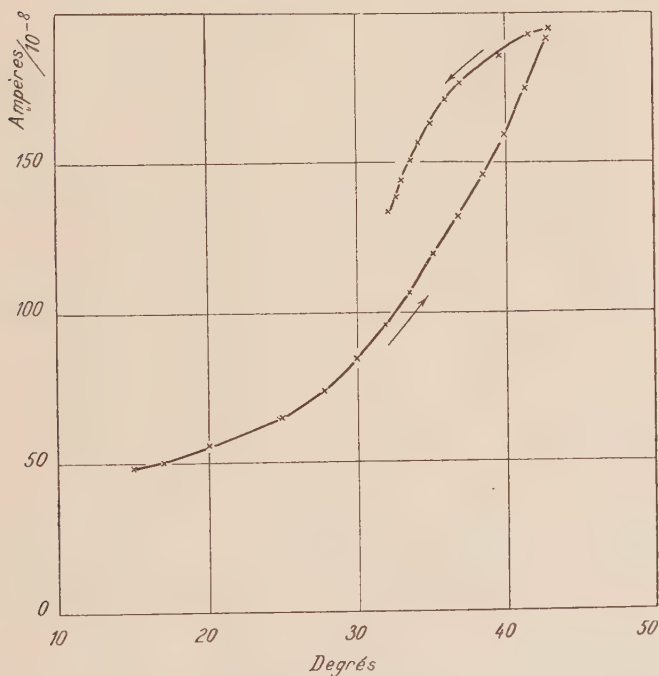


Fig. 19. — Variation apparente de la conductibilité avec la température.

température croît. Si l'on suit à des intervalles réguliers (5 ou 10 minutes), les variations simultanées de la température et de la déviation du galvanomètre, on obtient une courbe telle que celle que représente la figure 19 (première partie à températures croissantes). Le refroidissement qui suit

immédiatement l'échauffement, est plus lent. Observé aux mêmes intervalles, il donne une deuxième partie de courbe distincte de la première et correspondant à températures égales, à de plus faibles résistances. La longue durée du refroidissement (une dizaine d'heures environ) n'a pas permis de faire décrire à la température un cycle complet, mais il apparaît sur la courbe que l'on obtiendrait approximativement une courbe fermée, les deux résistances d'échauffement et de refroidissement s'égalisant pour les basses températures. On ne peut s'attendre à la fermeture absolue du cycle de variation, et d'une façon générale on ne pourra pas obtenir de résultats parfaitement nets car les mesures ne sont pas reproductibles. La roche à deux températures différentes n'est pas exactement dans le même état, ses propriétés ont pu varier et les efforts expérimentaux, devront tendre à rendre ces différents états aussi voisins que possible. Cette condition sera toujours difficile à remplir, car la durée du phénomène a, comme on le verra, une influence très grande et on ne pourra jamais que faire des mesures très espacées qui ne donneront qu'une représentation approximative du phénomène.

**Analyse du phénomène. Paliers de température.** — On est frappé, dans l'étude de la variation décrite précédemment, par l'écart important qui existe, à température égale, entre la résistance d'échauffement et de refroidissement.

Pour mieux définir le phénomène, j'ai donc examiné de plus près l'action de la température, en étudiant les variations de la résistance à température constante. A cet effet, j'ai chauffé l'enceinte jusqu'à une température déterminée qui a été maintenue pendant le temps voulu, à l'aide du rhéostat de réglage. Les déviations du galvanomètre, suivies à intervalles réguliers, depuis l'instant où la température choisie est atteinte, présentent les caractéristiques suivantes : l'intensité croît avec le temps, mais sa pente est de plus en

plus faible et, au bout d'une durée qui varie de 20 à 65 minutes selon les roches, elle atteint une valeur constante (fig. 20). Cette valeur constante correspond à un équilibre stable, et c'est ce qui nous servira par la suite, à le reconnaître. Tant que l'intensité est dans sa phase croissante, de petites variations de température, d'un côté ou de l'autre de la température fixe, n'agissent pas sur elle, elle continue à

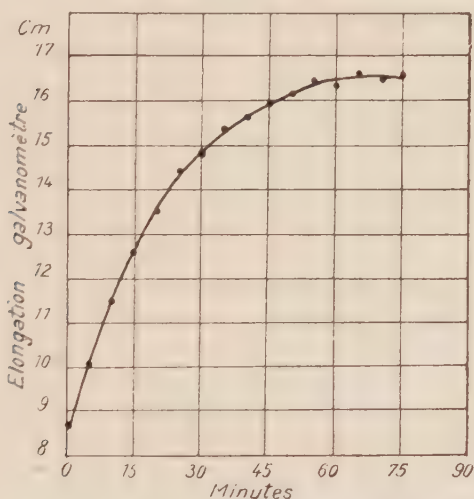


Fig. 20. — Etude d'un palier de température.

croître. Au contraire, lorsqu'elle a atteint sa valeur de palier, elle devient très sensible aux écarts de température même très faibles. Cette stabilité fait apparaître que la résistance correspondante peut être définie comme la résistance de la roche à la température choisie. Le même phénomène se reproduit, en sens inverse, quand on étudie la roche à températures décroissantes : l'intensité, à température constante, décroît de moins en moins rapidement et atteint, au bout d'une durée égale à la précédente, une valeur constante

qui correspond également à un équilibre stable. Ce phénomène, qui a été observé pour toutes les roches étudiées, et à toutes les températures, correspond donc à un certain retard de la variation de la résistance sur celle de la température. On peut se demander si la durée pendant laquelle l'intensité varie ne correspond pas au temps que prend l'échantillon pour se mettre en équilibre de température avec le milieu environnant. Le calcul montre qu'il n'en est rien et que cette durée peut être estimée à quelques minutes seulement. Elle n'a aucun rapport avec les 65 minutes que prend l'intensité, pour atteindre sa valeur stable et l'on a affaire, certainement, à une modification interne de la roche. Néanmoins, pour être assuré que le thermomètre ne se mette pas plus rapidement que la roche, en équilibre de température avec le milieu environnant, on a introduit entièrement son réservoir dans un morceau de craie. De cette manière, les indications du thermomètre correspondent exactement à la température intérieure de l'échantillon.

L'étude qui va suivre est donc certainement une étude de la variation de la résistivité de la roche avec sa température réelle.

**Etude expérimentale.** — On a vu qu'une variation continue de la température ne peut être utilisée, puisque la résistance correspondant à une température donnée ne peut être obtenue qu'à température constante. Il faut donc procéder par paliers successifs. A cet effet, l'échelle totale des températures a été divisée en trois parties égales et la roche étudiée aux quatre points extrêmes de ces intervalles. Il n'a pas été possible de choisir un plus grand nombre de températures fixes, à cause de la très grande lenteur des phénomènes. La température en chaque point choisi est maintenue constante jusqu'à obtention de l'intensité de palier correspondant à un équilibre stable. La variation de conductibilité de l'échantillon est alors telle que le représente la figure 21,

Les parties inférieures de la courbe représentent les élongations lues pendant la variation continue qui mène d'un

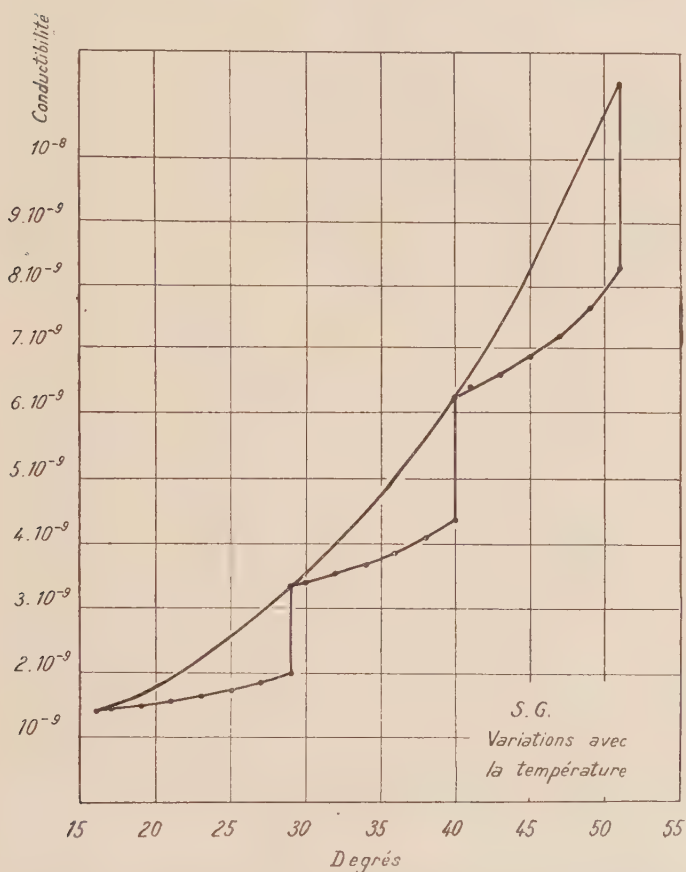


Fig. 21. — Variation de la conductibilité avec la température.

palier à l'autre et correspondent à la résistance apparente. Les parties verticales représentent la variation de l'intensité jusqu'à obtention de sa valeur stable au point le plus haut, et la courbe rejoignant les extrémités des segments verti-

caux représente la variation vraie de la conductibilité en fonction de la température. Toutes les roches étudiées fournissent une courbe analogue ne différant que par l'écart plus ou moins grand entre l'intensité initiale et l'intensité stable pour un palier de température, et par la pente de la courbe résultante. Les durées des paliers sont variables d'un palier à l'autre et d'une roche à l'autre, mais sont toujours comprises entre 20 et 65 minutes. Elles diminuent, en général, quand la température augmente mais cette diminution n'est pas absolue, on rencontre souvent des exceptions et la moyenne générale n'accuse qu'une très faible décroissance.

| Paliers             | Environ 30° | Environ 40° | Environ 50° |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| Durée (minutes) . . | 39          | 36          | 32          |

**Résultats numériques.** — Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant, qui donne les résistivités des roches aux paliers extrêmes de température.

On voit que l'écart entre les résistivités extrêmes est grand, la résistivité à 50 degrés pouvant être 10 fois plus petite que la résistivité à la température ordinaire.

**Vérification à températures décroissantes.** — Ce qui précède n'a, évidemment, de sens précis que si l'on est assuré que, pendant toute la durée de l'expérience, l'état de la roche n'a pas changé. Pour cela, il suffirait de montrer que la courbe des intensités à températures décroissantes, revient à son point de départ, c'est-à-dire que l'on peut faire décrire à la roche un cycle fermé. L'expérience est malheureusement difficile à réaliser, car le refroidissement est très lent. Pendant toute la durée de l'expérience, la roche se dessèche et d'autant plus que cette durée est plus importante. On peut

TABLEAU V

| Echan-<br>tillon | Nature       | 1 <sup>er</sup> palier |                      | 4 <sup>e</sup> palier |                     | Echan-<br>tillon | Nature           | 1 <sup>er</sup> palier |                      | 4 <sup>e</sup> palier |                     |
|------------------|--------------|------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
|                  |              | Temp.                  | Résis-<br>tivité     | Temp.                 | Résis-<br>tivité    |                  |                  | Temp.                  | Résis-<br>tivité     | Temp.                 | Résis-<br>tivité    |
| S. E. 2          | Granite      | 14,2                   | 3,0.10 <sup>8</sup>  | 51                    | 4,2.10 <sup>8</sup> | R. S. 1          | Schiste calcaire | 20,5                   | 5,6.10 <sup>8</sup>  | 51                    | 9,1.10 <sup>7</sup> |
| E. R. 278        | Granite      | 16,0                   | 2,1.10 <sup>8</sup>  | 51                    | 3,6.10 <sup>7</sup> | R. D.            | Calcaire         | 24,0                   | 1,8.10 <sup>6</sup>  | 51                    | 6,9.10 <sup>5</sup> |
| E. R. 279        | Granite      | 18,5                   | 4,0.10 <sup>7</sup>  | 51                    | 1,0.10 <sup>7</sup> | P. S. M.         | Calcaire         | 17                     | 1,1.10 <sup>7</sup>  | 51                    | 3,2.10 <sup>6</sup> |
| E. R. 289        | Granite      | 17,6                   | 4,3.10 <sup>7</sup>  | 51                    | 8,5.10 <sup>6</sup> |                  | jurassique       |                        |                      |                       |                     |
| E. R. 285        | Granite      | 18,0                   | 3,3.10 <sup>7</sup>  | 51                    | 4,5.10 <sup>6</sup> | S. A.            | Arko e           | 17,5                   | 6,3.10 <sup>9</sup>  | 50                    | 7,5.10 <sup>8</sup> |
| R.               | Microgranite | 16,2                   | 6,8.10 <sup>8</sup>  | 50                    | 1,2.10 <sup>8</sup> | A. M. S. 1       | Marbre           | 20,0                   | 4,4.10 <sup>8</sup>  | 50                    | 1,7.10 <sup>8</sup> |
| P. M. B. 1       | Prologine    | 15,0                   | 5,2.10 <sup>10</sup> | 51                    | 1,4.10 <sup>9</sup> | A. M. P.         | Marbre           | 20,7                   | 1,0.10 <sup>9</sup>  | 50                    | 2,6.10 <sup>8</sup> |
| P. M. B. 2       | Prologine    | 16,0                   | 6,5.10 <sup>10</sup> | 51                    | 3,8.10 <sup>9</sup> | A. M. J          | Marbre           | 22,0                   | 2,6.10 <sup>10</sup> | 51                    | 1,8.10 <sup>9</sup> |
| M.               | Diorite      | 14,6                   | 5,9.10 <sup>8</sup>  | 51                    | 9,6.10 <sup>7</sup> | A. M. B.         | Brèche           | 24,0                   | 8,6.10 <sup>7</sup>  | 50                    | 3,1.10 <sup>7</sup> |
|                  | quartzifère  |                        |                      |                       |                     | S. G.            | Gneiss           | 16,0                   | 6,8.10 <sup>8</sup>  | 51                    | 8,7.10 <sup>7</sup> |
| B. C. 2          | Basalte      | 19,5                   | 2,0.10 <sup>7</sup>  | 51                    | 5,2.10 <sup>7</sup> | P. D. 2 A.       | Schiste          | 17,6                   | 5,2.10 <sup>7</sup>  | 51                    | 1,6.10 <sup>7</sup> |
| N.               | Hyalobasalte | 13,4                   | 1,0.10 <sup>8</sup>  | 50                    | 9,0.10 <sup>7</sup> |                  | a sérénite       |                        |                      |                       |                     |
| P. J.            | Phonolite    | 19,0                   | 1,3.10 <sup>8</sup>  | 51                    | 2,7.10 <sup>7</sup> | P. D. 2 B.       | Schiste          | 16,5                   | 3,2.10 <sup>9</sup>  | 51                    | 3,6.10 <sup>8</sup> |
|                  |              |                        |                      |                       |                     |                  | a sérénite       |                        |                      |                       |                     |

réduire au minimum la durée d'échauffement, en réduisant celui-ci aux deux paliers initial et final mais le refroidissement est toujours de quelques heures pendant lesquelles la dessiccation reste inévitable. Par suite, la résistance de la roche augmente et la courbe revient au-dessous de son point de départ. C'est ce que montre la courbe type représentée sur la figure 22. La résistivité à  $28^{\circ}$  est le double à la

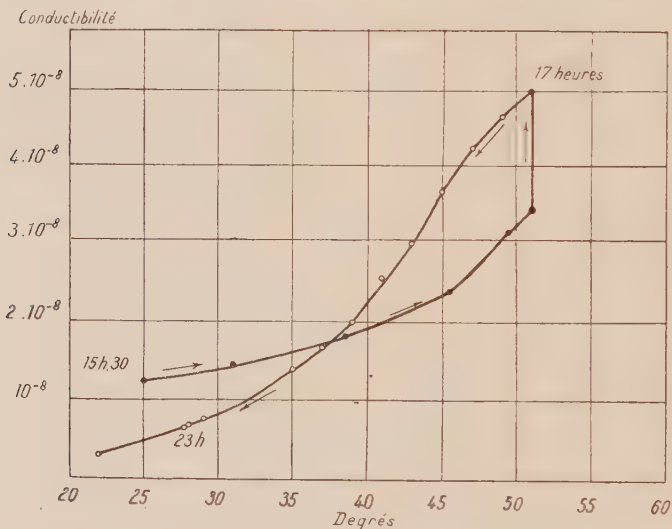


Fig. 22. — Etude d'un cycle fermé de température.

descente de ce qu'elle était à la montée, mais pendant cette expérience, la roche a perdu  $0^{\circ},0106$ , c'est-à-dire les  $0,09/1000$  de son poids. Cette perte de poids, qui est une perte d'eau suffit certainement à faire croître sa résistance dans de telles proportions et on ne peut conclure. Il est toutefois probable que, l'échauffement étant relativement beaucoup plus rapide que le cycle total ( $1/5$  du temps), la roche conserve pendant toute la première partie de l'expérience un état sensiblement constant et que les résultats obtenus sont suffisamment caractéristiques.

On peut remarquer, d'autre part, que la forme de la courbe ne correspond pas du tout à un phénomène d'hystérésis, car s'il y avait hystérésis la courbe de refroidissement resterait constamment au-dessus de la courbe d'échauffement.

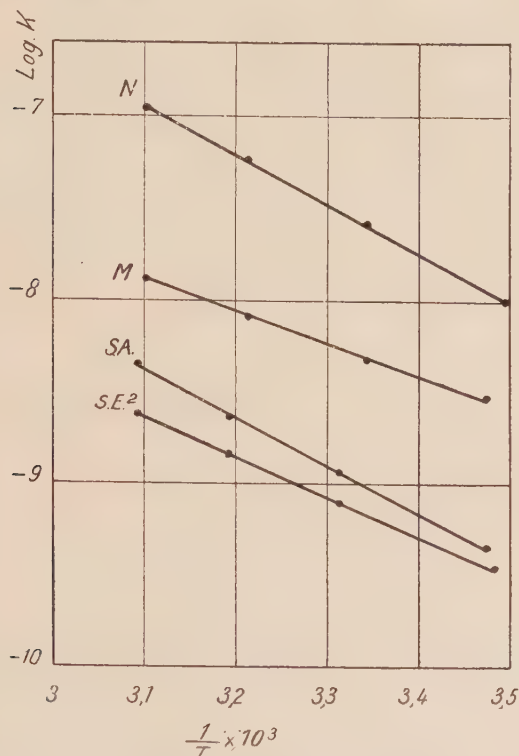


Fig. 23. — Vérification de la loi  $\text{Log } K = A - \frac{B}{T}$ .

**Rapprochement avec les isolants en général.** — On a vu, au premier chapitre, que d'après plusieurs auteurs la conductibilité électrique  $K$  des semi-conducteurs peut être représentée en fonction de la température absolue  $T$  par la relation :

$$\text{Log } K = A - \frac{B}{T}.$$

Il est intéressant de savoir si cette relation s'applique aux roches précédemment étudiées. Cette recherche s'effectue graphiquement en portant en abscisses les inverses des températures absolues et en ordonnées les logarithmes décimaux des conductibilités. Les points obtenus doivent se trouver sur une droite.

Chacune des roches étudiées a fourni quatre points qui se rangent en ligne droite, les erreurs maxima étant inférieures à 10 o/o. On peut donc en conclure que les roches suivent la loi précédente avec une très bonne approximation. Nous donnerons comme exemple les courbes obtenues pour quatre échantillons de natures très différentes (hyalobasalte, diorite quartzifère, granite et arkose) qui sont toutes quatre des droites parfaites (fig. 23),

Le calcul des coefficients B donne le résultat suivant :

TABLEAU VI

*Coefficient « B » de la formule  $\text{Log } K = A - B/T$  (1)*

| Echan-<br>tillon | Nature       | « B »               | Echan-<br>tillon | Nature     | « B »               |
|------------------|--------------|---------------------|------------------|------------|---------------------|
| S. E. 2          | Granite      | 2,2.10 <sup>3</sup> | R. S. 1          | Schiste    | 2,1.10 <sup>3</sup> |
| E. R. 278        | Granite      | 2,0 »               |                  | calcaire   |                     |
| E. R. 279        | Granite      | 2,0 »               | R. D.            | Calcaire   | 1,4 »               |
| E. R. 289        | Granite      | 2,0 »               | P. S. M.         | Calcaire   | 1,5 »               |
| E. R. 285        | Granite      | 2,5 »               |                  | jurassique |                     |
| R.               | Microgranite | 2,1 »               | S. A.            | Arkose     | 2,7                 |
| P. M. B. 1       | Protogine    | 4,1 »               | A. M. S. 1       | Marbre     | 1,3 »               |
| P. M. B. 2       | Protogine    | 3,3 »               | A. M. P.         | Marbre     | 1,9 »               |
| M.               | Diorite      | 2,2 »               | A. M. J.         | Marbre     | 3,9 »               |
|                  | quartzifère  |                     | A. M. B.         | Brèche     | 1,6 »               |
| B. C. 2          | Basalte      | 2,0 »               | S. G.            | Gneiss     | 2,4 »               |
| N.               | Hyalobasalte | 2,7 »               | P. D. 2 A.       | Schiste    | 1,5 »               |
| P. J.            | Phonolite    | 2,0 »               |                  | à séricite |                     |
|                  |              |                     |                  | Schiste    | 2,8 »               |
|                  |              |                     |                  | à séricite |                     |

(1) Au coefficient près de transformation des logarithmes vulgaires en logarithmes népériens.

Les droites obtenues sont grossièrement parallèles et les valeurs correspondantes de B sont en moyenne de l'ordre de  $2.10^3$ . Un simple calcul d'erreur montre que ces valeurs sont suffisamment caractéristiques de l'échantillon donné. En effet, l'état de la roche a changé pendant l'expérience, surtout du fait de la dessiccation : mais l'expérience à cycle de température fermé a montré que la résistivité à température ordinaire n'a varié que du simple au double. On peut admettre que la résistivité obtenue pour la température maxima n'excède pas le double de la valeur qu'elle aurait eu si l'état de la roche n'avait pas varié. Ceci étant admis, le coefficient B étant donné par :

$$B = \frac{\log K_1 - \log K_0}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}}$$

l'erreur commise sur  $\log K_1$  n'excède pas 0,30 et l'erreur commise sur B est inférieure à :

$$dB = \frac{0,30}{0,37} \cdot 10^3,$$

$$dB < 0,8 \cdot 10^3.$$

Les valeurs de B peuvent donc être considérées comme représentant suffisamment le phénomène et le fait qu'elles aient, pour des roches de nature très diverses, des grandeurs très voisines est très intéressant par les conclusions qu'on en peut tirer relativement à la nature de la conductibilité électrique des roches.

**Interprétation théorique.** — La loi expérimentale :

$$\text{Log } K = A - \frac{B}{T}$$

s'appliquant aux roches, il convient maintenant de donner un sens physique précis à ses coefficients.

L'analogie de forme de cette loi avec la loi de Van-t'Hoff relative à la variation thermique des constantes d'équilibre

a poussé à assimiler la conductibilité électrique à une constante d'équilibre et à écrire :

$$\frac{d \text{Log } K}{dT} = - \frac{q}{RT^2}$$

ce qui donne, par intégration :

$$\text{Log } K = A - \frac{q}{RT} \quad (1)$$

expression dans laquelle  $q$  représente une quantité de chaleur. Afin de pouvoir donner un sens à cette quantité de chaleur, admettons que la conductibilité de la substance est due au mouvement des ions et qu'elle est proportionnelle au nombre des ions libres, c'est-à-dire au nombre des ions ayant une énergie supérieure à une certaine limite  $u$ . La mécanique statistique donne la relation :

$$K = C e^{-\frac{u}{kT}}$$

$k$  étant la constante de Boltzmann.

$$\text{Log } K = A - \frac{u}{kT} \quad (2)$$

La comparaison des relations (1) et (2) montre alors que la constante  $q$  peut donc être interprétée comme la chaleur de libération d'un ion-gramme dans le réseau cristallin, c'est-à-dire comme la quantité d'énergie qu'il faut lui fournir pour qu'il prenne part à la conductibilité. Ce nombre  $q$  est caractéristique d'une catégorie d'ions déterminée et sa valeur s'exprime en calories par ion-gramme par la relation :

$$q = 4,59 \frac{d \log K}{d \frac{1}{T}} .$$

**Application aux roches.** — Si la théorie précédente est exacte, on peut conclure du fait que la conductibilité électrique des roches suit la loi linéaire :

$$\log K = A - \frac{B}{T}$$

que cette conductibilité est au moins en grande partie due à des ions. Comme les valeurs de  $B$  sont sensiblement égales, on peut en déduire de même que les ions qui se déplacent sont de natures semblables pour les différentes sortes de roches. La chaleur de libération de tels ions serait alors :

$$q = 4,59 \times 2.10^3$$

$$q = 9,2.10^3 \text{ cal. gr./ion gr.}$$

Ces résultats ne peuvent néanmoins être considérés que comme une hypothèse; d'autant plus qu'on verra plus loin qu'un autre genre d'expériences a conduit à des conclusions très différentes relatives à la nature de la conductibilité qui ne pourrait plus être définie comme une conductibilité presque exclusivement ionique.

---

## CHAPITRE VII

### Influence de l'eau d'imbibition.

Les roches dans le sol sont toutes imprégnées d'eau. La mesure de leur résistance à l'état dit « naturel » tient compte de cette eau d'imbibition mais ne suffit pas à en définir le mode d'action. La conductibilité naturelle d'une roche dépend d'autres facteurs et pour caractériser le facteur eau d'imprégnation, il faut se placer dans les cas extrêmes : roches parfaitement sèches et roches saturées d'humidité.

**Etude des roches parfaitement desséchées.** — Une telle étude est une étude comparative qui s'effectue en trois temps :

- Mesure sur la roche à l'état naturel,
- Dessiccation de l'échantillon,
- Mesure sur l'échantillon desséché.

1) Comme il a été dit plus haut, les roches à l'état dit « naturel » sont des roches extraites du sol depuis un certain nombre de mois, dont les échantillons sont taillés depuis quelques semaines et, n'ayant subi aucun traitement spécial, sont conservés dans une vitrine communiquant avec l'air ambiant. Ces échantillons ont été étudiés par la méthode générale et leur résistivité déterminée. Dès la fin de la mesure, ils sont introduits dans un pèse-filtre hermétiquement clos et pesés. Il est nécessaire de faire ces deux déterminations à intervalle de temps aussi faible que possible pour qu'elles se rapportent au même état de la roche, car

on a vu que l'état d'une roche peut changer en quelques heures.

2) Le pèse-filtre est ouvert et l'ensemble est introduit dans un four électrique où il séjourne pendant trois jours à la température de  $190^{\circ}$ . Une telle température n'est pas assez élevée pour causer dans la roche la moindre transformation chimique, mais elle est suffisante pour la dessécher complètement. C'est ce qui ressort nettement du tableau suivant, montrant la variation de poids de l'échantillon en fonction de la durée de son séjour dans le four électrique.

TABLEAU VII

| Séjours<br>dans le four | Echantillons<br>E R. 279 | R. S. 1          | P. D. 2 A.         |
|-------------------------|--------------------------|------------------|--------------------|
| Jours                   | Nature : granite         | Schiste calcaire | Schiste à sérécité |
| 0                       | 83,0188                  | 106,1360         | 35,0787            |
| 1                       | 82,8660                  | 106,1300         | 35,0733            |
| 2                       | 82,8620                  | 106,1280         | 35,0675            |
| 3                       | 82,8620                  | 106,1280         | 35,0678            |
| 4                       | 82,8618                  | 106,1250         | 35,0668            |
| 5                       | 82,8605                  | 106,1254         |                    |

Au bout de trois jours, en effet, les variations observées de la masse de l'échantillon sont de l'ordre de grandeur des erreurs d'expérience et présentent, de plus, un aspect oscillatoire encadrant un point d'équilibre.

L'échantillon est alors sorti du four et réintégré dans le pèse-filtre. Lorsque l'ensemble est refroidi, on fait une deuxième pesée qui définit l'échantillon à l'état sec. La conservation de celui-ci dans un pèse-filtre permet de ne pas faire l'étude immédiate de l'échantillon en restant cependant assuré qu'il ne peut, entre temps, absorber aucune trace d'humidité.

3) Avant la mesure à l'état sec, l'échantillon est verni extérieurement au bitume de Judée et introduit dans l'appar-

reil où sa résistivité est déterminée. L'expérience est faite avec le maximum de sensibilité, c'est-à-dire en soumettant l'échantillon à une tension de 600 volts. Dans ces conditions, le courant minimum que peut indiquer le galvanomètre est égal à  $10^{-9}$  ampères et la plus grande résistance mesurable est  $6 \cdot 10^{14}$  ohms.

**Résultats.** — 1<sup>o</sup> *Quantité d'eau contenue dans l'échantillon à l'état dit « naturel ».* — Le tableau XVIII montre la perte de masse d'un certain nombre d'échantillons pendant leur séjour dans le four électrique. Cette perte de masse, qui est égale à la masse de l'eau évaporée, est variable suivant les échantillons mais reste toujours très faible. Sa valeur la plus fréquente est de l'ordre du millième de la masse totale de la roche. On verra cependant plus loin que des quantités d'eau aussi petites jouent un rôle prépondérant dans le mécanisme de la conductibilité.

2<sup>o</sup> *Variation de la résistivité.* — L'intensité du courant traversant l'échantillon a, dans tous les cas, été inférieure à la limite de sensibilité du galvanomètre. La résistance de l'échantillon desséché est donc toujours supérieure à la résistance limite définie plus haut.

Le tableau IX résume les résultats obtenus. On verra que la variation de résistivité est parfois très grande et que dans l'ensemble elle est d'autant plus forte que la quantité d'eau évaporée est plus importante; ce qui tendrait à faire croire que la conductibilité est une conductibilité électrolytique due à l'eau d'imbibition.

Je donnerai ici, à titre d'indication, les résultats de mesures semblables faites au laboratoire central d'électricité et qui m'ont été très aimablement communiqués par la Société des Marbres du Boulonnais, à Hydrequet Rinxent (Pas-de-Calais). Ces mesures portent sur des plaquettes de marbre de dimensions  $20 \times 20 \times 2$  cm. et ont été effectuées sous une tension continue de 300 volts dans les conditions suivantes :

TABLEAU VIII

| Echan-<br>tillon | Nature              | Poids<br>moyen<br>P | Perte<br>totale<br>de poids<br>p | Perte<br>de poids<br>p o/oo | Echan-<br>tillon | Nature                 | Poids<br>moyen<br>P | Perte<br>totale<br>de poids<br>p | Perte<br>de poids<br>p o/oo |
|------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| S. E. 1          | Granite             | 63                  | 0,1118                           | 1,77                        | S. A.            | Arkose                 | 85                  | 0,0936                           | 1,10                        |
| S. E. 2          | Granite             | 76                  | 0,1194                           | 1,57                        | S. M. 1          | Marne                  | 139                 | 2,0700                           | 14,90                       |
| E. R. 285        | Granite             | 62                  | 0,1310                           | 2,12                        | S. M. 2          | Marne                  | 107                 | 1,5380                           | 14,40                       |
| E. R. 289        | Granite             | 65                  | 0,2707                           | 4,16                        | I. F. 7 17,5     | Schiste                | 106                 | 0,9830                           | 9,30                        |
| E. R. 279        | Granite             | 82                  | 0,2992                           | 3,70                        | I. F. 7 24       | Grès                   | 97                  | 0,3400                           | 3,50                        |
| E. R. 278        | Granite             | 83                  | 0,0299                           | 0,36                        | I F. 18          | Grès                   | 166                 | 0,7920                           | 4,77                        |
| R.               | Microgranite        | 5,2                 | 0,0161                           | 3,16                        | I F. 9           | Grès                   | 142                 | 0,6770                           | 4,77                        |
| P. M. B. 1       | Protogine           | 61                  | 0,0180                           | 0,29                        | R. S. 1          | Schiste calcaire       | 106                 | 0,0512                           | 0,48                        |
| G.               | Obsidienne          | 4,5                 | 0,0277                           | 6,09                        | P. S. M.         | Calcaire<br>jurassique | 41                  | 0,1522                           | 3,75                        |
| M.               | Diorite quartzifère | 5,6                 | 0,0054                           | 0,96                        | S. G.            | Gneiss                 | 118                 | 0,0185                           | 0,16                        |
| N.               | Hyalobasalte        | 5,3                 | 0,0614                           | 11,60                       | P. D. 2 A.       | Schiste à sérénite     | 35                  | 0,0555                           | 1,58                        |
| P. J.            | Phonolite           | 12                  | 0,0433                           | 3,60                        | P. D. 2 B        | Schiste à sérénite     | 4                   | 0,0041                           | 1,02                        |

TABLEAU IX

| Echan-<br>tillon | Nature                 | Perte<br>de<br>poids<br>o/oo | Résisti-<br>vité<br>avant<br>dessicca-<br>tion<br>$R_1$ | Résistivité<br>après<br>dessicca-<br>tion<br>$R_2$ | Echan-<br>tillon | Nature           | Perte<br>de<br>poids<br>o/oo | Résisti-<br>vité<br>avant<br>dessicca-<br>tion<br>$R_1$ | Résistivité<br>après<br>dessicca-<br>tion<br>$R_2$ |
|------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| I. F. 175        | Schiste                | 9,30                         | $4,1 \cdot 10^5$                                        | $> 7,0 \cdot 10^{11}$                              | E. R. 289        | Granite          | 4,16                         | $1,6 \cdot 10^7$                                        | $> 3,5 \cdot 10^{11}$                              |
| I. F. 18         | Grès                   | 4,77                         | $6,0 \cdot 10^5$                                        | $> 6,2 \cdot 10^{11}$                              | R. S. 1          | Schiste calcaire | 0,48                         | $2,1 \cdot 10^7$                                        | $> 3,2 \cdot 10^{11}$                              |
| S. M. 2          | Marne                  | 14,40                        | $8,7 \cdot 10^5$                                        | $> 3,7 \cdot 10^{11}$                              | E. R. 279        | Granite          | 3,70                         | $2,2 \cdot 10^7$                                        | $> 3 \cdot 10^{11}$                                |
| P. S. M.         | Calcaire<br>jurassique | 3,75                         | $1,9 \cdot 10^6$                                        | $> 2,3 \cdot 10^{11}$                              | P. J.            | Phonolite        | 3,60                         | $2,3 \cdot 10^7$                                        | $> 1,6 \cdot 10^{11}$                              |
| I. F. 7. 24      | Grès                   | 3,50                         | $5,1 \cdot 10^6$                                        | $> 8,1 \cdot 10^{11}$                              | S. G             | Gneiss           | 0,16                         | $1,7 \cdot 10^8$                                        | $> 2,6 \cdot 10^{11}$                              |
| P. D. 2 A.       | Schiste à sérécite     | 1,58                         | $5,8 \cdot 10^6$                                        | $> 1,3 \cdot 10^{11}$                              | P. M. B. 1       | Protogine        | 0,29                         | $5,5 \cdot 10^8$                                        | $> 1,6 \cdot 10^{11}$                              |
| P. D. 2 B.       | Schiste à sérécite     | 1,02                         | $7,1 \cdot 10^6$                                        | $> 4,4 \cdot 10^{11}$                              | E. R. 278        | Granite          | 0,36                         | $5,6 \cdot 10^9$                                        | $> 3,3 \cdot 10^{11}$                              |
|                  |                        |                              |                                                         |                                                    | S. E. 1          | Granite          | 1,77                         | $7,1 \cdot 10^9$                                        | $> 4,6 \cdot 10^{11}$                              |

1<sup>o</sup> Après dessiccation des plaques pendant 15 heures à 110°.

2<sup>o</sup> Après un séjour des plaques pendant 5 jours dans une atmosphère ayant un état hygrométrique égal à 60 o/o et une température de 20°. Ces mesures ont donné les résultats suivants :

TABLEAU X

| Echantillon    | Résistivité<br>après dessiccation    | Résistivité<br>après séjour<br>en atmosphère<br>humide |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Napoléon       | $> 1,2.10^{13}$ ohms/cm <sup>3</sup> | $2,0.10^9$ ohms/cm <sup>3</sup>                        |
| Grand Mélange  |                                      |                                                        |
| Napoléon tigré | $3,5.10^{12}$                        | $1,2.10^9$                                             |
| Notre Dame     | $3,0.10^{12}$                        | $1,0.10^9$                                             |
| Lunel rosé     | $9,0.10^{11}$                        | $1,8.10^8$                                             |
| Lunel uni      | $3,5.10^{12}$                        | $1,6.10^8$                                             |
| Lunel ramagé   | $3,0.10^{12}$                        | $1,8.10^8$                                             |

Ces expériences montrent, comme les miennes, l'influence de la dessiccation sur la conductibilité électrique des marbres. Ces résultats sont intéressants à comparer quoique, d'une part la sensibilité des appareils du laboratoire central d'électricité, supérieure à celle des miens, ait permis de mesurer des résistances 20 fois plus élevées que celles que je pouvais étudier et que, d'autre part, les échantillons étudiés fussent moins complètement desséchés que ceux sur lesquels a porté mon travail. On peut s'attendre, pour des roches desséchées trois jours à 190°, à une résistivité de beaucoup supérieure à celle d'échantillons desséchés pendant 15 heures à 110°.

**Mesure électrométrique des résistivités des roches parfaitement desséchées.** — C'est pour cette raison que j'ai jugé intéressant de déterminer, par une méthode électrométrique

beaucoup plus sensible, la résistivité d'un certain nombre d'échantillons parfaitement desséchés.

La méthode employée est la suivante : l'échantillon est serré à la façon ordinaire dans les étriers. L'une de ses extrémités est au sol et l'autre est reliée à l'électromètre. Celui-ci étant chargé à un potentiel connu, on étudie la loi de sa décharge à travers l'échantillon. L'électromètre employé est un Wulff bifilaire donnant 2 volts 5 par division.

1° Si la résistance de l'échantillon est une résistance ohmique, l'intensité du courant qui la traverse est proportionnelle à la différence du potentiel à laquelle elle est soumise et l'on peut écrire :

$$(1) \quad i = \frac{V}{R} .$$

Or, à chaque instant, l'intensité du courant est proportionnelle à la quantité d'électricité qui traverse l'échantillon et l'on a :

$$(2) \quad i = \frac{dq}{dt} = \frac{Cdv}{dt} .$$

Des relations (1) et (2) on tire :

$$C \frac{dv}{dt} = \frac{V}{R} .$$

L'intégration donne :

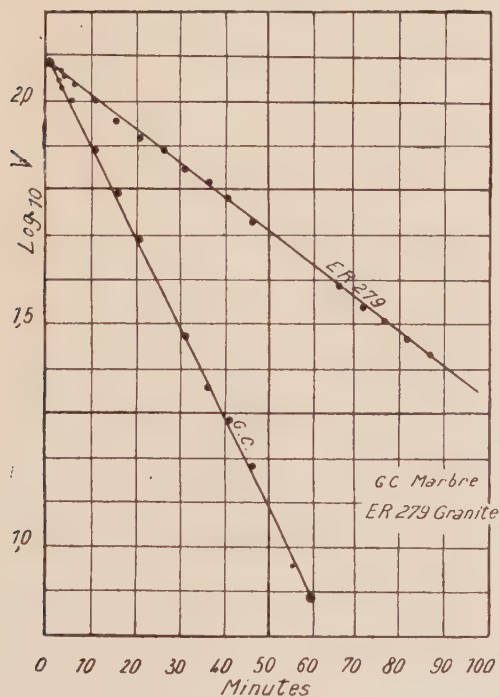
$$(3) \quad \left\{ \begin{array}{l} \log \frac{V}{V_0} = \frac{-t}{CR} , \\ V = V_0 e^{\frac{-t}{CR}} . \end{array} \right.$$

2° Les résultats expérimentaux correspondent très bien à l'hypothèse précédente et, dans tous les cas, la courbe représentant la variation de  $\log . V$  en fonction du temps est une droite (fig. 24). La résistance de l'échantillon parfaitement sec est donc une résistance constante.

Les valeurs obtenues pour les résistivités sont résumées dans le tableau suivant :

TABLEAU XI

| Echantillon | Nature           | Résistivité         |
|-------------|------------------|---------------------|
| I. F. 9     | Grès             | $2,3 \cdot 10^{15}$ |
| S. A.       | Arkose           | $1,3 \cdot 10^{15}$ |
| E. R. 279   | Granite          | $5,3 \cdot 10^{14}$ |
| G. C.       | Marbre (Carrare) | $4,4 \cdot 10^{14}$ |
| S. G.       | Gneiss           | $2,6 \cdot 10^{14}$ |
| S. M. I     | Marne            | $4,9 \cdot 10^{13}$ |
| A. P.       | Porphyre         | $3,3 \cdot 10^{12}$ |
| D. L.       | Labradorite      | $1,4 \cdot 10^{12}$ |
| S. E. I     | Granite          | $9,2 \cdot 10^{11}$ |
| A. M. J.    | Marbre jaune     | $4,2 \cdot 10^{11}$ |


 Fig. 24. — Vérification de la loi :  $\text{Log } \frac{V}{V_0} = \frac{-t}{CR}$ .

Comme pouvait le laisser prévoir l'étude des échantillons secs à l'aide d'un galvanomètre, certaines des résistivités obtenues sont très élevées, d'un ordre de grandeur comparable aux résistivités des isolants industriels (ébonite  $2 \cdot 10^{15}$ ) <sup>(1)</sup>. Certaines roches parfaitement sèches se comportent donc comme des isolants et leur conductibilité à l'état dit naturel serait due à l'eau d'imbibition qu'elles contiennent. Elle ne peut, en effet, correspondre à un passage du courant à travers les minéraux de la roche, car un tel ensemble paraît isolant. Si l'on considère que, lorsque l'échantillon est sec, le courant traverse les minéraux qui le constituent, les résultats obtenus sont en plein accord avec les résultats énoncés au chapitre premier concernant la résistivité de la plupart des minéraux. Ceux-ci ont, en effet, une résistivité comprise entre  $10^{11}$  et  $10^{16}$  ohms  $\text{cm}^3$  et il est fort probable que leur agglomération puisse donner des corps de résistivités comprises entre  $10^{11}$  et  $10^{16}$  ohms/ $\text{cm}^3$ , telles que celles qui ont été trouvées.

#### Mécanisme de la conductibilité due à l'eau d'imbibition.

— Ainsi qu'il a été dit plus haut, la première hypothèse que l'on pouvait faire était que la conductibilité était électrolytique et entièrement due à l'eau d'imbibition. Dans ces conditions, connaissant la quantité d'eau perdue par l'échantillon et la longueur de celui-ci, on peut calculer la section de la colonne d'eau de même hauteur ayant le même volume que l'eau évaporée. Si la conductibilité est due à l'eau, la résistance de cette colonne est égale à celle de l'échantillon, ou tout au moins du même ordre de grandeur, et on peut en calculer la résistivité. Le calcul a donné les résultats suivants :

(1) Tables de constantes de la Société de Physique.

TABLEAU XII

*Résistivité de l'eau équivalente.*

| Echan-<br>tillon | Nature                 | Résisti-<br>vité<br>eau<br>équiv. | Echan-<br>tillon | Nature    | Résisti-<br>vité<br>eau<br>équiv. |
|------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------|-----------|-----------------------------------|
| I. F. 18         | Grès                   | $6,5 \cdot 10^3$                  | S. M. 2          | Marne     | $5,7 \cdot 10^4$                  |
| P. S. M.         | Calcaire<br>jurassique | $6,7 \cdot 10^3$                  | I. F. 7. 24      | Grès      | $6,1 \cdot 10^4$                  |
| P. D. 2 A.       | Schiste à sérécite     | $9,9 \cdot 10^3$                  | E. R. 289        | Granite   | $8,7 \cdot 10^4$                  |
| I. F. 7. 17,5    | Schiste                | $1,1 \cdot 10^4$                  | P. M. B. 1       | Prologine | $1,1 \cdot 10^5$                  |
| P. D. 2 B.       | Schiste à sérécite     | $1,2 \cdot 10^4$                  | E. R. 279        | Granite   | $1,1 \cdot 10^5$                  |
| R. S. 1          | Schiste calcaire       | $1,6 \cdot 10^4$                  | E. R. 278        | Granite   | $2,9 \cdot 10^6$                  |
| S. G.            | Gneiss                 | $3,1 \cdot 10^4$                  | S. E. 1          | Granite   | $2,5 \cdot 10^7$                  |
| P. J.            | Phonolite              | $5,6 \cdot 10^4$                  |                  |           |                                   |

Les résultats sont très variables et il est intéressant de comparer les résistivités obtenues avec les résistivités des eaux souterraines (27), dont les plus résistantes sont celles qui circulent dans les grès et dont la résistivité est de l'ordre de  $2,5 \cdot 10^4$  ohms; les autres ont une résistance plus faible, toujours inférieure à  $5 \cdot 10^3$  qui varie suivant le terrain dont elles sont issues (eau des marnes :  $\rho = 5 \cdot 10^3$  ohms/cm., et eau des craies :  $\rho = 2 \cdot 10^3$  ohms/cm.). Si l'on se reporte au tableau précédent, on voit que les résistivités de l'eau équivalente obtenues pour les dix premières roches paraissent très normales pour des eaux d'imbibition et que leur grandeur n'infirme pas l'hypothèse faite. Par contre, les cinq roches suivantes fournissent des résistivités beaucoup trop grandes, qui conduiraient à supposer que l'on se trouve en présence d'une eau rigoureusement pure, ce qui n'est pas probable. Les résultats précédents ne permettent donc pas de conclure d'une façon définitive si la conductibilité d'une roche humide a la forme simple d'une conductibilité électrolytique due uniquement à l'eau d'imbibition quoique le fait ne paraisse pas probable.

**Etude de l'action de l'humidité sur la surface de l'échantillon.** — On pouvait penser également que cette action de l'humidité est une action de surface sur l'échantillon. Pour vérifier cette hypothèse, j'ai étudié les actions de surface sur des corps isolants en volume et ne pouvant absorber d'eau dans leur masse, c'est-à-dire des bâtons de verre et un prisme de minéral.

1<sup>o</sup> *Etude d'un bâton de verre à surface latérale polie.*

— L'échantillon a été soumis au même traitement que les éprouvettes rocheuses, c'est-à-dire desséché et verni. Dans ces conditions, il est introduit dans l'appareil où il donne les résultats suivants :

L'échantillon nouvellement verni ne donne aucune déviation et a donc une résistivité pratiquement infinie.

Après séjour dans l'atmosphère de la salle, et mesure immédiate, il donne une élongation qui est annulée au bout d'une minute du fait de l'action desséchante du chlorure de calcium contenu dans la cage.

Si l'on souffle sur l'échantillon, on obtient en 15 secondes une élongation de quelques centimètres qui s'annule avec une vitesse de 1 cm. par minute environ. Dans aucun de ces cas, par conséquent, l'action de l'humidité sur la surface n'agit plus que quelques minutes. Cette action serait donc sans importance dans une étude telle que la mienne, où l'élongation du galvanomètre n'est lue qu'après une durée minimum de 5 minutes.

Le même bâton, non verni, donne des résultats identiques mais, à élongation égale, celle-ci est acquise beaucoup plus vite et disparaît en 20 secondes environ.

2<sup>o</sup> *Etude d'un bâton de verre dépoli.* — Par insufflation sur un bâton dépoli non verni, on obtient une élongation de quelques centimètres qui s'annule en 15 à 20 secondes.

Sur un bâton dépoli et verni, l'humidité causée par l'insufflation n'a aucune action. Le spot reste constamment au zéro.

3<sup>o</sup> *Etude d'un bâton de quartz taillé.* — Il s'agit ici d'un morceau de quartz rocheux taillé en prisme et dont la surface latérale est légèrement rugueuse. Les résultats sont identiques à ceux que l'on obtient avec le verre dépoli.

On peut tirer de cette étude les conclusions suivantes :

Pour les échantillons à surface latérale très lisse, l'humidité exerce sur cette surface une action qui peut être forte, mais reste toujours très brève (quelques minutes) et ne peut influencer sur les mesures telles qu'elles sont faites. Le vernissage latéral ralentit cette action mais ne l'annule pas.

Pour les échantillons à surface latérale rugueuse, l'humidité exerce sur cette surface une action très brève qui est annulée par le vernissage latéral. Il y a donc intérêt à travailler sur des échantillons à surface latérale légèrement rugueuse et à vernir cette surface. On est ainsi assuré que l'humidité ne peut pénétrer à l'intérieur du volume de la roche, grâce au vernis extérieur et, d'autre part, on n'a à craindre aucun dépôt sur la surface de l'échantillon ou, tout au moins, aucune action conductrice de ce dépôt, s'il existe. Les éprouvettes que j'ai étudiées se sont toujours présentées sous la forme de prismes ou de cylindres à surface latérale non polie et par suite remplissent bien les conditions précédentes.

De toutes façons, il est démontré que l'action de l'humidité sur les roches ne peut provenir de la surface. C'est une action en volume dont on va s'efforcer de découvrir le mécanisme.

*Etude des roches saturées d'humidité.* — La dessiccation rend, on l'a vu, les roches extrêmement résistantes. On peut se demander si l'effet inverse ne se produit pas et si la saturation d'eau n'augmente pas considérablement leur conductibilité. Si cet effet existe, il faudra chercher quel est le mode d'action de cette eau d'imbibition et si elle agit par sa conductibilité propre. Dans ce cas, l'imbibition par une solution

très conductrice devra avoir une action infiniment plus forte que la saturation d'eau distillée. Le problème a donc été traité de deux façons différentes.

1° *Échantillons satures d'eau distillée.* — La saturation est effectuée à l'autoclave en prenant les précautions suivantes : La roche ne doit baigner que dans la vapeur d'eau, et être abritée de l'eau de condensation qui se forme sur le couvercle. A cet effet, l'échantillon est placé dans un creuset de platine et surmonté d'une petite capsule en quartz. L'en-

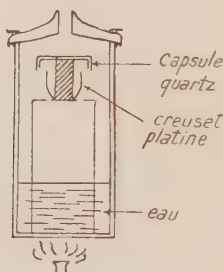


Fig. 25. — Mise à l'autoclave de l'échantillon.

semble est placé sur un support qui le maintient au-dessus du niveau de l'eau liquide (fig. 25) le montage offre, en outre, l'avantage de permettre de recueillir dans le creuset de platine l'eau qui a baigné l'échantillon et dont on peut faire l'analyse.

Les échantillons ont tous été maintenus au minimum 24 heures dans l'autoclave fermé et celui-ci a été chauffé pendant quelques heures à  $130^{\circ}$  (pression correspondante 1 kg. 75). Les résultats sont les suivants : D'une façon générale, les roches ainsi traitées acquièrent une conductibilité qui est relativement très grande, égale en moyenne à 1 000 fois leur conductibilité à l'état dit naturel. C'est ce que montre le tableau suivant :

TABLEAU XIII

*Résistivité des roches saturées d'eau distillée.*

| Echantillon | Nature                | Masse totale<br>état naturel | Séjour<br>dans<br>l'autoclave |                | Résistivité<br>état naturel | Résistivité<br>roche saturée | Masse totale<br>d'eau<br>absorbée | Eau absorbée 0/100 |
|-------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|             |                       |                              | chauffé                       | non<br>chauffé |                             |                              |                                   |                    |
| S. E. 2     | Granite               | 76,0065                      | 1 h.                          | 25 h.          | $1,6 \cdot 10^9$            | $3,1 \cdot 10^5$             | 0,2655                            | 3,5                |
| P. D. 1     | »                     | 58,2645                      | 3                             | 20             | $3,8 \cdot 10^8$            | $6,6 \cdot 10^5$             | 0,0395                            | 0,7                |
| R. S. 1     | Schiste<br>calcaire   | 106,1350                     | 2,45                          | 45             | $1,2 \cdot 10^8$            | $5,0 \cdot 10^6$             | 0,0135                            | 0,1                |
| P. D. 2 A.  | Schiste<br>à séricite | 35,1315                      | 3,15                          | 45             | $1,7 \cdot 10^7$            | $1,2 \cdot 10^5$             | 0,1535                            | 4,4                |
| S. A.       | Arkose                | 85,9335                      | 2,30                          | 94             | $2,1 \cdot 10^8$            | $7,1 \cdot 10^4$             | 1,2115                            | 14,1               |
| S. E. 1     | Granite               | 63,3050                      | 13,30                         | 216            | $7,1 \cdot 10^9$            | $1,6 \cdot 10^5$             | 0,1453                            | 2,3                |

La quantité d'eau absorbée par les échantillons est très faible. Elle est en général de l'ordre du millième de la masse totale de l'échantillon. Exceptionnellement, et pour des roches particulièrement poreuses, cette quantité peut atteindre le centième de la masse totale. En première approximation, on peut dire que la résistivité de la roche saturée est d'autant plus faible que la quantité d'eau absorbée est plus grande.

L'analyse de l'eau ayant baigné l'échantillon ne montre que des traces indosables de silice et d'alumine.

La saturation d'eau augmente donc considérablement la conductibilité électrique d'une roche. Or cet état de saturation n'est pas un état artificiel, car il est fort possible, au contraire, que les roches de l'intérieur du sol soient dans un état très voisin de celui que l'on obtient à l'autoclave. Il faudrait évidemment aller profondément dans le sol pour trouver des températures de 130° et la nature de la saturation est un peu différente, puisqu'elle s'obtient pour de faibles tempéra-

tures mais pendant une durée pratiquement illimitée. Le paragraphe suivant montre, cependant, que les deux états paraissent être d'une grande analogie.

2° *Étude des roches ayant conservé leur humidité naturelle.* — J'ai voulu comparer les résultats précédents à ceux que fournissent des échantillons de roche ayant conservé, autant que possible, l'eau qu'elles contenaient dans le sol. La Société Rodio a été assez aimable, ce dont je tiens ici à la remercier, pour me faire parvenir des morceaux de carottes de sondage qui ont été paraffinés sur toute leur surface dès leur extraction du sol et conservés, jusqu'à la mesure, dans une atmosphère saturée d'eau. Les résistivités de tels échantillons sont les suivantes :

TABLEAU XIV

| Echantillon  | Nature  | Résistivité |
|--------------|---------|-------------|
| I. F. 1      | Grès    | $4,9.10^4$  |
| I. F. 4. 36  | »       | $6,0.10^4$  |
| I. F. 4. 31  | »       | $8,4.10^4$  |
| I. F. M. 16  | »       | $7,3.10^4$  |
| I. F. M. 13  | »       | $6,5.10^4$  |
| E. R. 285 A. | Granite | $7,5.10^5$  |
| E. R. 285 B. | »       | $1,6.10^5$  |
| E. R. 289    | »       | $4,0.10^5$  |
| E. R. 279    | »       | $4,9.10^5$  |
| E. R. 278    | »       | $9,8.10^5$  |

Ces résistivités sont du même ordre de grandeur que celles des roches saturées d'eau distillée qui ont été étudiées au paragraphe précédent. On peut donc en conclure que la plupart des roches, à leur état de gisement, sont saturées d'eau et que la grandeur de leur conductibilité, dans cet état, est très différente de celle des mêmes roches mesurées en laboratoire. Les échantillons se dessèchent à l'air libre et le traitement qu'on leur fait subir ne peut qu'accentuer la variation de leur teneur en eau.

3° *Échantillons saturés d'eau salée.* — Afin de voir si l'eau d'imbibition agit par sa conductibilité propre, j'ai saturé l'échantillon d'une solution de  $\text{ClNa}$  à 2 o/o. Dans ces conditions, si la conductibilité se fait par le liquide d'imbibition, celle-ci doit-être, dans le cas présent, au moins mille fois plus grande que dans le cas de l'eau distillée.

La saturation s'effectue par la méthode indiquée précédemment, à la seule différence près que le creuset contenant la roche est rempli de solution et que l'échantillon y baigne entièrement.

L'échantillon étudié, un granite S. E. 2 a été maintenu 5 jours dans l'autoclave et celui-ci a été chauffé pendant 13 h. 30. A sa sortie de l'autoclave, il a été vivement lavé à l'eau distillée afin de débarrasser sa surface de la solution conductrice qui la recouvre, puis essuyé. La mesure a été faite immédiatement après.

La résistivité de la roche ainsi traitée, qui était de  $1,6 \cdot 10^5$  ohms à l'état naturel, est devenue  $8,5 \cdot 10^4$  ohms. Son ordre de grandeur est donc absolument le même que celui d'une roche identique traitée à l'eau distillée. On peut en conclure, soit que l'eau n'agit pas par sa conductibilité propre, mais par un mécanisme de libération d'ions à l'intérieur de l'échantillon, soit que le sel de la solution ne pénètre pas dans la roche. La structure de celle-ci ne laisserait alors le passage qu'aux molécules d'eau pure et on serait ramené au cas précédent. Un calcul simple montre qu'il est impossible, expérimentalement, de choisir entre les deux hypothèses précédentes. La détermination de la quantité de  $\text{ClNa}$  pénétrée dans l'échantillon est impossible et il faudrait donc déterminer la quantité de sel perdue dans l'ensemble de la solution baignant la roche. Cette quantité est très faible. Dans le cas qui nous occupe, la roche absorbe  $0 \text{ cm}^3 \cdot 15$  de solution qui contiennent 0 g. 003 de  $\text{ClNa}$ . Or, pour la baigner entièrement, il faut au minimum  $50 \text{ cm}^3$  de solution contenant 1 g. de  $\text{ClNa}$ . Il s'agirait donc de démontrer que cette

petite quantité de sel a diminué de 3 mg., ce qui ne donnerait pas de résultats vraiment certains.

**Etude de la variation continue de la résistivité en fonction de la teneur en eau.** — On a vu qu'entre ses deux états extrêmes de résistivité très élevée et de résistivité très faible, la roche peut prendre une infinité d'états intermédiaires. Il est donc particulièrement intéressant de connaître ces états intermédiaires et leur variation en fonction de la teneur en eau.

On ne peut étudier une roche, d'une façon continue, entre ses deux états extrêmes. En effet, une roche complètement sèche ne peut se saturer d'eau à l'air libre et une roche saturée d'eau ne peut, inversement, se dessécher complètement à l'air libre. Il faut donc prendre la variation à ses deux extrêmes, c'est-à-dire étudier la variation de la résistivité en fonction de la teneur en eau pour une roche sèche qui s'hydrate et pour une roche saturée d'eau qui se dessèche. Dans les deux cas, l'étude se fait de la même façon : l'échantillon est pesé avant et après chaque mesure et ces pesées déterminent la variation de la teneur en eau.

*1° Hydratation à l'air libre.* — Considérons une roche desséchée qui s'hydrate naturellement du fait de l'humidité de l'air. L'hydratation est très rapide au début, si rapide parfois qu'une pesée exacte de l'échantillon est rendue impossible par la variation même de son poids, puis cette hydratation se ralentit et finit par devenir très faible. A ce moment-là, la roche a atteint, au point de vue de la teneur en eau, un état d'équilibre avec le milieu ambiant qui est, à peu près, l'état « naturel » qui a été défini. Si l'on examine la variation de sa conductibilité en fonction du pourcentage d'eau absorbée, on reconnaît que celle-ci varie exponentiellement avec ce facteur. C'est ce que montre clairement l'exemple suivant, qui concerne un granite de la vallée de l'Esla (Espagne).

TABLEAU XV

| Masse<br>de l'échantillon | Masse d'eau<br>absorbée | Masse d'eau<br>absorbée o/oo | Conductibilité       |
|---------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------|
| 62,1879                   |                         |                              | $2,2 \cdot 10^{-11}$ |
| 62,2026                   | 0,0147                  | 0,24                         | $3,2 \cdot 10^{-10}$ |
| 62,2206                   | 0,0327                  | 0,56                         | $1,8 \cdot 10^{-9}$  |
| 62,2323                   | 0,0444                  | 0,72                         | $3,45 \cdot 10^{-9}$ |
| 62,2454                   | 0,0575                  | 0,91                         | $6,70 \cdot 10^{-9}$ |
| 62,2741                   | 0,0862                  | 1,39                         | $4,10 \cdot 10^{-8}$ |
| 62,2792                   | 0,0913                  | 1,48                         | $7,20 \cdot 10^{-8}$ |
| 62,2812                   | 0,0938                  | 1,51                         | $1,20 \cdot 10^{-7}$ |
| 62,2819                   | 0,0940                  | 1,52                         | $1,60 \cdot 10^{-7}$ |

Cette variation est représentée, en fonction de la teneur en eau, par une courbe dont l'allure devient très rapide pour les grandes teneurs en eau, telle que celle de la figure 26. La première partie de l'eau absorbée exerce, comme on le voit, une faible action sur la conductibilité mais à partir d'un certain point un très faible accroissement de la teneur en eau cause de très fortes variations de la conductibilité. C'est ainsi que, pour la courbe figurée, la pente très faible au début devient 4 000 fois plus forte pour les grandes teneurs en eau.

Les différentes roches étudiées (granites, schiste, arkose) fournissent des résultats absolument analogues et il semble bien qu'on ait là une propriété caractéristique. La conductibilité d'une roche, lorsque celle-ci atteint son état d'hydratation limite, devient extrêmement sensible aux très petites variations de la teneur en eau. Il est difficile de dire à quoi correspond cet « état sensible », mais il est probable qu'il correspond à une imprégnation du volume total de l'échantillon par l'humidité atmosphérique.

2° *Dessiccation à l'air libre.* — Si l'on considère maintenant une roche saturée d'eau qui se dessèche naturellement dans l'atmosphère, cette dessiccation est encore plus rapide

que l'hydratation précédente. L'expérience est donc, dans ce cas, extrêmement difficile, car la conductibilité varie durant la mesure même et la correspondance entre la pesée et la

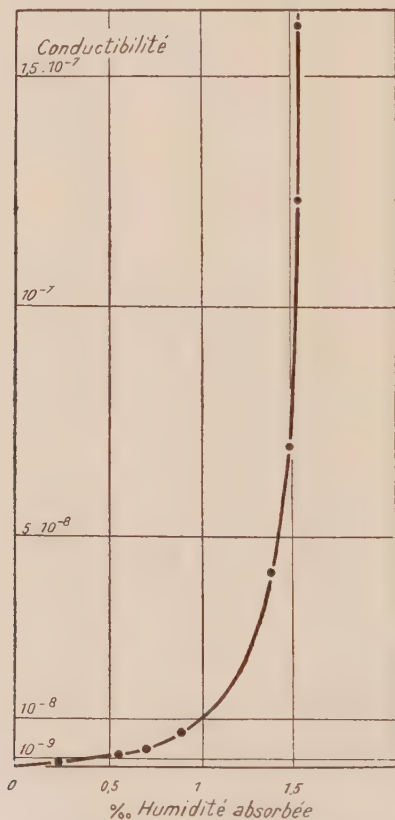


Fig. 26. — Variation de la conductibilité avec la quantité d'eau absorbée.

conductibilité qui s'y rattache est très délicate à établir. Les résultats paraissent néanmoins être les suivants.

La résistivité croît d'abord lentement pour les premières quantités d'eau perdues, puis plus rapidement lorsqu'on

s'approche de l'état limite indiqué ci-dessus où la roche atteint au point de vue humidité, un état d'équilibre avec le milieu ambiant. Dans cet état, qui correspond grossièrement à l'état dit « naturel » la roche ne se dessèche presque plus et sa résistivité est très sensible à la moindre variation de teneur en eau. C'est ce que montre clairement le tableau suivant, concernant un schiste calcaire de la vallée du Rio-Navia (Espagne).

TABLEAU XVI

| Masse<br>de l'échantillon | Masse totale<br>d'eau<br>éaporée | Eau<br>éaporée o/oo | Résistivité           |
|---------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| 106,1470                  |                                  |                     | 5,06. 10 <sup>6</sup> |
| 106,1450                  | 0,0020                           | 0,020               | 6,05. 10 <sup>6</sup> |
| 106,1390                  | 0,0080                           | 0,070               | 3,16. 10 <sup>7</sup> |
| 106,1385                  | 0,0085                           | 0,080               | 3,90. 10 <sup>7</sup> |
| 106,1383                  | 0,0087                           | 0,082               | 6,90. 10 <sup>7</sup> |

La courbe représentant la variation de la résistivité en fonction de la quantité d'eau évaporée à l'allure représentée par la figure 27. La pente, faible au début, devient forte dès que l'on se rapproche de l'état limite. Celui-ci est, comme dans le cas de l'hydratation à l'air libre, un état sensible pour la résistivité de l'échantillon.

Dans les deux cas, les premières quantités d'eau absorbées ou évaporées n'ont qu'une faible influence sur les propriétés électriques de l'échantillon. Ceci suggère l'idée que l'hydratation et l'évaporation ne sont pas uniformes mais bien plus avancées au voisinage des surfaces qu'au centre et que les propriétés électriques ne sont sensiblement influencées que lorsque la variation de teneur en eau atteint l'échantillon dans l'ensemble de son volume.

Variation totale de conductibilité entre les deux états extrêmes. — On peut rapprocher les valeurs obtenues pour la conductibilité d'un même échantillon entre ses deux états

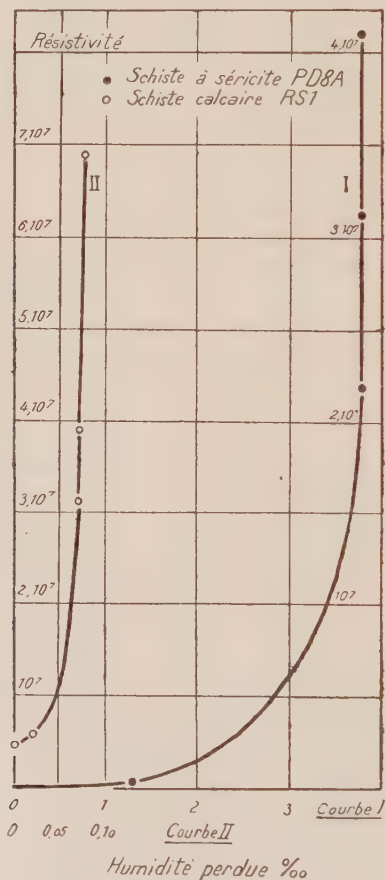


Fig. 27. — Variation de la résistivité avec la quantité d'eau évaporée.

extrêmes, dessiccation complète et saturation d'eau. Ce rapprochement donnera une idée de l'ampleur de la variation de la conductibilité en fonction de la teneur en eau. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

TABLEAU XVII

| Echan-<br>tillon | Nature              | Masse<br>de<br>l'échantillon<br>saturé | Masse<br>de<br>l'échantillon<br>desséché | Masse d'eau<br>absorbée | Eau absorbée<br>o/oo | Résistivité<br>de<br>l'échantillon<br>saturé | Résistivité<br>de<br>l'échantillon<br>desséché |
|------------------|---------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| S. E. 2          | Granite             | 76,2720                                | 75,8945                                  | 0,3775                  | 5,0                  | $3,1 \cdot 10^5$                             | $\gg 3,8 \cdot 10^{11}$                        |
| P.*D. 1          |                     | 58,3040                                | 58,2520                                  | 0,0520                  | 0,9                  | $6,6 \cdot 10^5$                             | $\gg 2,0 \cdot 10^{11}$                        |
| P. S. 1          | Schiste<br>calcaire | 106,1485                               | 106,1255                                 | 0,0230                  | 0,2                  | $5,0 \cdot 10^6$                             | $\gg 3,2 \cdot 10^{11}$                        |
| S. E. 1          | Granite             | 63,4503                                | 63,2398                                  | 0,2105                  | 3,0                  | $1,6 \cdot 10^5$                             | $9,2 \cdot 10^{11}$                            |

Echantillon saturé d'eau de mer. — La rédaction du chapitre étant terminée, j'ai eu l'occasion de faire deux expériences ayant quelque intérêt pour la solution d'une question posée dans celui-ci : le mode d'action de l'eau d'imbibition. J'en donnerai ici succinctement la teneur. Il s'agit d'abord d'un morceau de porphyre rouge de l'Esterel pris sur la côte, au-dessous du niveau de la mer et conservé depuis son extraction dans une solution à 3 o/o à ClNa. Sa résistivité, mesurée après nettoyage de sa surface à l'eau distillée et séchage rapide de celle-ci est égale à  $6,7 \cdot 10^3$  ohms/cm<sup>3</sup>. Elle est donc du même ordre de grandeur ( $\rho = 10^4$  ohms/cm<sup>3</sup>) quoiqu'un peu moindre que les résistivités des roches saturées d'eau distillée et on ne peut déceler aucune action spéciale des sels contenus dans l'eau d'imbibition.

Echantillon imbibé de vapeur de mercure. — L'autre échantillon étudié a été desséché pendant 5 jours au four électrique à 190° puis conservé pendant 40 jours dans un tube fermé en présence de mercure. La résistivité de l'échantillon sec était égale à  $5,3 \cdot 10^{14}$  ohms/cm<sup>3</sup>. Après le traitement subi par la roche, elle est tombée au 1/60<sup>e</sup> de sa valeur, c'est-à-

dire à  $7,7 \cdot 10^{12}$  ohms/cm<sup>3</sup>. La variation est faible et on ne peut guère conclure sur une expérience unique. Il est toutefois probable que, si le mercure pénètre dans la roche, il ne peut pénétrer qu'en très petite quantité ne modifiant ainsi que très légèrement sa conductibilité.

---

## CHAPITRE VIII

### Nature de la conductibilité.

**Généralités.** — Dans les expériences suivantes, j'ai tenté de déterminer le mode de passage du courant électrique à travers les roches. L'étude de la variation de la conductibilité de celles-ci en fonction de la température a, comme on l'a vu précédemment, conduit à supposer que le passage du courant à travers un échantillon rocheux était dû à un transport d'ions. Il était donc particulièrement intéressant de voir si l'étude de propriétés d'un ordre très différent (action chimique du courant) conduiraient à des conclusions semblables.

La recherche de la nature de la conductibilité électrique a été faite pour un très grand nombre de semi-conducteurs (51) et il ne semble pas qu'elle ait jamais conduit à des résultats définitifs. Le problème est très difficile et les déductions reposent sur des bases fragiles car, si les différents modes de conductibilités sont facilement définis théoriquement ils ne le sont pas pratiquement, et il n'existe pas de propriété permettant de les distinguer d'une façon absolue. On ne peut donc s'attendre, dans le cas présent, à des résultats définitifs mais à la présentation d'un certain nombre de méthodes qui permettent d'attaquer le problème.

**Principe de la première méthode.** — La méthode employée consiste à interposer l'échantillon entre les deux électrodes d'un montage électrolytique de façon que le courant soit

obligé de le traverser. Du côté de l'anode, on met une solution d'un sel d'un métal facilement décelable et de l'autre côté une solution conductrice quelconque. La quantité d'électricité déplacée dans l'expérience est déterminée par un voltamètre témoin monté en série avec l'électrolyse.

Dans ces conditions, plusieurs cas sont à envisager.

1<sup>o</sup> *La roche possède une conductibilité entièrement électronique.* — L'échantillon interposé se conduira donc comme un conducteur métallique et les ions métal mis en liberté viendront se décharger sur la surface regardant l'anode. *La caractéristique de ce cas sera un dépôt métallique visible sur la surface de l'échantillon* et si la conductibilité est entièrement électronique la quantité de métal déposée correspondra quantitativement à la loi de Faraday.

2<sup>o</sup> *La roche possède une conductibilité entièrement électrolytique.* — La roche se comportera comme une solution électrolytique et il s'y produira une libération des ions de deux signes. Le métal, mis en liberté dans le compartiment anodique ne pourra en aucun cas se fixer, sous forme métallique sur la surface de l'échantillon. Ou bien il se combinera avec l'anion propre de la roche, et il y aura permutation entre les cations, où il traversera celle-ci si elle lui est perméable, et se déposera sous forme métallique sur la cathode, à moins qu'il ne se combine alors avec l'anion de la solution cathodique. De toute façon, *la caractéristique de ce cas sera l'absence de dépôt métallique sur la surface de l'échantillon et au besoin, présence sous une forme quelconque du métal dans le compartiment cathodique.*

3<sup>o</sup> *Cas intermédiaire.* — Un cas intermédiaire est à envisager, c'est celui qui existe pour un grand nombre de semi-conducteurs (51) et où les deux modes de conductibilité se superposent. On aura, à la fois, un dépôt métallique sur la surface de l'échantillon, et un dépôt de celui-ci sous forme combinée ou non dans l'échantillon et dans le compartiment cathodique. La comparaison de la quantité de métal déposée

au total avec la masse de métal correspondant à la loi de Faraday fournira des éclaircissements sur la nature de la perméabilité de la roche.

**Dispositif expérimental.** — 1° *Montage de l'échantillon.* — L'échantillon est taillé en lamelles à contour cylindrique d'épaisseur aussi faible que le permet sa texture, 4 mm. au maximum (La lamelle doit, en effet, posséder une rigidité suffisante pour permettre un montage solide) puis collé avec du baume de Canada aux bases rodées de deux tubes en

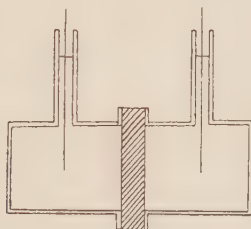


Fig. 28. — Montage de l'échantillon pour électrolyse.

verre fermés à l'autre extrémité (fig. 28) qui contiennent les électrolytes. Un tube de verre de faible diamètre est soudé sur la partie latérale des tubes et sert à l'introduction de l'électrolyte et au passage de l'électrode. Un tel montage a toujours montré une étanchéité parfaite et on est ainsi assuré que le métal que l'on recueille dans le compartiment cathodique n'a pu que traverser la lamelle,

Les électrodes employées sont des fils de platine.

2° *Métal et solutions employés.* — Le métal choisi a été dans tous les cas le cuivre qui a été préféré aux autres métaux à cause de la facilité de son dosage. Dans le compartiment anodique on a mis une solution de  $\text{SO}^4\text{Cu}$  à 1 o/o et dans le compartiment cathodique, soit une solution de  $\text{SO}^4\text{H}^2$  à 1 o/o, soit une solution de  $\text{SO}^4\text{Na}^2$  à 1 o/o, cette dernière

ayant été préférée à la première dans le cours du travail, parce qu'elle n'attaque pas la roche. De toutes façons, la nature de la solution cathodique n'influe pas sur le résultat du travail qui ne consiste qu'en dosage du cuivre.

3<sup>o</sup> *Voltamètre témoin*. — J'ai employé dans les premières expériences un voltamètre à sulfate de cuivre puis, je lui ai préféré dans la suite un voltamètre à nitrate d'argent, trois fois plus sensible.

**Marche d'une expérience.** — Le mode expérimental est le suivant :

1<sup>o</sup> Chaque échantillon étant monté entre ses tubes de verre, on en relie un certain nombre (2 à 6) en série avec une pile, par l'intermédiaire du voltamètre témoin et d'une résistance de garantie.

L'intensité du courant qui traverse l'ensemble est variable suivant les cas, mais elle reste toujours de l'ordre du milli-ampère. La durée de l'expérience est comprise entre 8 et 15 jours et on interrompt celle-ci lorsque le dépôt métallique du voltamètre témoin est jugé suffisant.

2<sup>o</sup> L'expérience étant arrêtée, on recueille le plus rapidement possible le cuivre déposé sur la surface de l'échantillon et dans le compartiment cathodique, afin d'éviter qu'il ne se dissolve dans les solutions. Cette opération est effectuée par attaque à l'acide nitrique à 50 o/o et rinçages successifs à l'eau distillée.

3<sup>o</sup> Une première série d'expériences a montré qu'en additionnant les masses de cuivre recueillies sur l'échantillon et à la cathode, on est très loin de retrouver la quantité totale de cuivre mise en jeu par l'électrolyse. Cette quantité de cuivre n'est, à vrai dire, pas exactement déterminée puisque la conduction de l'électricité peut se faire par l'intermédiaire d'autres ions que les ions Cu (ions H) mais l'action de ces derniers n'intervient que comme un terme correctif, beaucoup trop faible pour expliquer les effets constatés expéri-

mentalement. Cette perte de cuivre pourrait être due à la lenteur de la traversée de l'échantillon par les ions cuivre, et afin de le vérifier, j'ai soumis celui-ci à une deuxième électrolyse entre deux solutions de  $\text{SO}^4\text{Na}^2$  à 10/o. Si le cuivre ne traverse la roche que lentement, on doit retrouver dans le compartiment cathodique après passage d'une quantité d'électricité égale, un poids de cuivre équivalent à celui que l'on recueille dans la première expérience.

4° L'expérience montre que, de cette façon, on est encore loin de retrouver la quantité théorique de cuivre. La différence doit logiquement se trouver à l'intérieur de l'échantillon et, pour le démontrer, j'ai pulvérisé puis attaqué celui-ci à l'acide nitrique à 50 o/o. Cette opération n'a été effectuée que pour les échantillons que je pouvais sans trop de difficulté pulvériser à l'aide du matériel à ma disposition. L'attaque à l'acide nitrique étant insuffisante pour détruire la roche, mon but n'était pas de recueillir tout le cuivre contenu dans l'échantillon mais simplement de montrer que celui-ci en a retenu une quantité non négligeable.

5° Le dosage du cuivre recueilli est effectué par la méthode électrolytique (1).

**Résultats expérimentaux.** — J'ai fait treize expériences de ce genre sur des échantillons provenant de onze roches distinctes. Ces expériences n'ayant pas été faites dans le but d'obtenir des résultats définitifs, mais dans celui-ci d'orienter les recherches futures il n'est pas nécessaire d'en donner ici le détail. Je donnerai cependant un certain nombre de résultats qui paraissent désormais acquis.

Les échantillons étudiés se classent, suivant leur nature, de la façon suivante :

3 granits différents (1, 2, 3);

(1) Je tiens ici à remercier particulièrement Mme L. S. Mathieu Lévy dont l'aide et les conseils m'ont été d'un précieux secours pour cette partie du travail.

2 échantillons d'une même phonolite (4, 5);  
2 échantillons d'un même basalte (6, 7);  
2 grès différents (8, 9);  
1 schiste (10), 1 ardoise (11), 1 porphyre (12) et 1 labradorite (13).

Parmi ces échantillons :

1<sup>o</sup> Neuf ont présenté un dépôt métallique sur leur surface regardant l'anode. Dans la majorité des cas (échantillons 1, 2, 4, 6 et 13) on a sur une faible partie de cette surface un dépôt brillant, bien visible. La caractéristique de ce dépôt est qu'il ne recouvre pas la surface totale de l'échantillon mais simplement quelques millimètres carrés en un ou deux points de cette surface (surface moyenne d'un échantillon : 10 cm<sup>2</sup>). Dans d'autres cas (échantillon 5) on retrouve ce dépôt sous forme pulvérulente dans le fond du compartiment anodique; l'ion cuivre s'est déchargé sur la surface sans y adhérer. Et enfin, parfois, il n'est décelable qu'à l'analyse chimique (échantillons 7, 8 et 10).

Ce dépôt métallique représente du 1/100<sup>e</sup> aux 23/100<sup>e</sup> de la quantité théorique de cuivre.

2<sup>o</sup> Tous ont fourni un dépôt de cuivre dans le compartiment cathodique. Dans certains cas, ce cuivre se présente sous forme pulvérulente sur la cathode (échantillons 1, 3, 4, 6, 9, 11 et 12) : dans les autres il est dissous dans la solution cathodique et on peut reconnaître sa présence à la teinte bleue de celle-ci. Les échantillons étudiés se sont donc tous montrés, dans une certaine mesure, perméables aux ions cuivre.

La quantité de cuivre recueillie dans le compartiment cathodique représente du 1/100<sup>e</sup> aux 55/100<sup>e</sup> de la quantité théorique de cuivre.

3<sup>o</sup> Six échantillons ont été détruits pour déterminer, par la méthode décrite précédemment, la quantité de cuivre qu'ils avaient retenue (échantillons 5, 6, 9, 10, 11 et 13). Dans toutes ces roches, sauf une (n<sup>o</sup> 13) on a retrouvé du

cuivre. Cette quantité de cuivre est en général très faible et ne représente que des  $5/100^e$  aux  $45/100^e$  de la quantité totale de cuivre manquant pour atteindre la quantité théorique. Cette faiblesse des résultats provient, d'une part, du fait que l'attaque de la roche est très incomplète et d'autre part, de la nature du dépôt métallique à l'intérieur de celle-ci. Cette nature doit varier suivant la texture de la roche, selon que celle-ci est cristalline ou colloïdale, ou l'un et l'autre partiellement. Il semble que l'on retrouve plus facilement le cuivre dans les échantillons à structure schisteuse (Schiste n° 10, 20 o/o et ardoise n° 11, 45 o/o).

**Classification des échantillons.** — Le nombre d'expériences faites est trop petit, pour que l'on puisse en tirer une conclusion définitive, mais il semble néanmoins probable que le pourcentage de cuivre ayant traversé l'échantillon soit caractéristique de la nature de la roche, des roches très voisines laissant passer des quantités de cuivre dans des proportions sensiblement égales. Les roches les plus perméables seraient les grès et les schistes (coefficient  $1/2$ ) et les moins perméables les ardoises (coefficient  $1/100^e$ ) en passant par les basaltes ( $1/3$ ), les granites ( $1/4$ ), les porphyres ( $1/5^e$ ) et les phonolites et labradorites ( $1/7^e$ ).

Le pourcentage de cuivre déposé sur la roche est beaucoup moins caractéristique; il varie dans de larges proportions pour des natures de roches très voisines et on ne peut conclure.

**Interprétation théorique. Nature de la conductibilité.** —  
1° L'expérience est concluante en ce qui concerne la conductibilité électronique. Quand il y a eu dépôt métallique sur la surface de l'échantillon, il y a forcément eu conductibilité métallique de la substance. Deux points semblent désormais acquis.

Quand une roche possède la conductibilité électronique,

elle ne possède pas que celle-ci. Le transport de l'électricité se fait en partie par un déplacement d'électrons et en partie par un processus que l'on ne peut attribuer qu'à des ions. La conductibilité est à la fois électronique et électrolytique.

Quand une roche possède la conductibilité électronique, elle ne la possède pas dans toute sa section. Le fait que le dépôt métallique est localisé en certains points montre que la conductibilité n'est métallique que pour une faible fraction de celle-ci. Il ne m'a pas été possible jusqu'ici de déterminer quelles sont les caractéristiques minérales de ces fractions à conductibilité électronique.

2<sup>o</sup> En ce qui concerne la conductibilité électrolytique, il est impossible de conclure. Il y a transport de métal à travers la roche, mais la quantité de métal transportée est très au-dessous de celle qui correspond à la loi de Faraday. Il y a simultanément transport et arrêt de cuivre dont les ions se fixent partiellement sur la roche. Cet arrêt paraît dû à une permutation entre les ions cuivre et les cations naturels de la roche, mais il n'est pas impossible que la roche se montre aussi en volume, un conducteur partiellement électronique et que les ions cuivre se déchargent à l'intérieur de celle-ci en donnant un dépôt métallique. Ce phénomène permettrait, peut-être, de donner une origine aux dépôts métalliques naturels (cuivre arborescent). Il faudrait pour résoudre cette question, faire une étude de beaucoup plus longue durée (plusieurs mois) et comparer les résultats avec ceux que donne une étude microscopique de l'échantillon.

**Diffusion des solutions à travers les roches.** — Dans l'étude précédente, on a admis que tout le cuivre recueilli à la cathode avait été transporté par le courant électrique. Or, il pourrait se faire que ce cuivre n'ait été transporté que par une diffusion simple, indépendante de toute action électrique. Il fallait donc vérifier soit que ce phénomène de diffusion n'existe pas, soit qu'il est trop faible pour expliquer les résultats précédents.

Ces expériences durent très longtemps (plusieurs mois) et je n'ai pu en faire qu'un très petit nombre. J'en donnerai néanmoins les résultats. L'expérience a été faite de la façon suivante. Le montage était le même que celui qui a servi aux expériences d'électrolyse. L'un des compartiments était rempli d'une solution à 5 o/o de  $\text{SO}^4\text{Cu}$ , et l'autre soit d'une solution étendue d'acide sulfurique (roches ISB et AP) soit d'eau distillée. L'expérience a duré de deux à trois mois, puis au bout de ce temps, le liquide contenu dans le compartiment opposé au sulfate de cuivre a été analysé. Les deux premiers dosages (ISB et AP) ont été effectués par la méthode électrolytique et les deux autres par une méthode colorimétrique au ferrocyanure de potassium. La solution recueillie dans le montage P. E. n'a donné aucune réaction colorée et l'expérience montre qu'un tel liquide contient moins de 0 mg. 05 de cuivre. Pour l'autre solution (P. J.) le dosage n'a pu être effectué que d'une façon approximative et le résultat obtenu n'est à considérer que comme un ordre de grandeur.

Les résultats obtenus sont les suivants, dans lesquels D représente le coefficient de diffusion déterminé par la relation :

$$A = D \frac{st}{\rho} C,$$

ou :

$A$  = quantité de cuivre déposée, grammes ;

$s$  —  $e$  section et épaisseur de l'échantillon, centimètres ;

$t$  — durée de l'expérience, jours ;

$c$  = concentration de la solution, g./cm<sup>3</sup>.

| Echantillon | Nature    | A                       | t  | D                      |
|-------------|-----------|-------------------------|----|------------------------|
| I. S. B.    | Granite   | 2,6 . 10 <sup>-3</sup>  | 90 | 6,5 . 10 <sup>-5</sup> |
| A. P.       | Porphyre  | 7,0 . 10 <sup>-3</sup>  | 90 | 8,9 . 10 <sup>-5</sup> |
| P. J.       | Phonolite | 0,5 . 10 <sup>-3</sup>  | 60 | 3,5 . 10 <sup>-6</sup> |
| P. E.       | Schiste   | 0,05 . 10 <sup>-3</sup> | 60 | 3,7 . 10 <sup>-7</sup> |

La petitesse des valeurs de  $A$  montre que la diffusion n'est intervenue que pour une proportion négligeable dans les essais d'électrolyse.

Les nombres obtenus pour  $D$  sont, comme il fallait s'y attendre, très petits puisque le plus grand est seulement le dix millième du coefficient de diffusion dans l'eau pure.

Des mesures exactes de  $D$  donneraient sans doute des indications sur la structure de la roche. Les valeurs ci-dessus ne sont que des minima, puisqu'une partie du cuivre peut rester fixée dans la roche par permutation; ils ne peuvent donc permettre aucune conclusion de cette nature. Pour donner un résultat, une expérience de diffusion devrait, ou bien avoir une durée de plusieurs années, ou bien être faite à chaud, ce qui demanderait une technique tout à fait différente.

---

## BIBLIOGRAPHIE

### I. — *Traités généraux.*

1. REICH (H.). — Geologische Unterlagen der angewandten Geophysik. *Handbuch der Experimentalphysik*, Leipzig, 1930. Band 25, 3 Teil. Angewandte Geophysik.  
HEINE (W.). — Praktische Anwendung der Elektrischen Methoden. *Handbuch der Experimentalphysik*, Leipzig, 1930. Band 25, 3 Teil. Angewandte Geophysik.
2. REICH (H.). — Eigenschaften der Gesteine. *Handbuch der Geophysik*, Berlin, 1931. Band 6, Lief. 1.
3. AMBRONN. — *Methoden der Angewandten Geophysik*, Dresden-Leipzig, 1926.
4. LANDOLT-BÖRNSTEIN. — *Physikalisch-Chemische Tabellen*, Berlin, 1923.

### II. — *Mémoires.*

5. ADAMS et DAY. — *Proc. Roy. Soc. London*, **25** (1877), 113.
6. ADDENBROOK (G. L.). — *Proc. phys. Soc. London*, **40** (1928), 40.
7. ADDENBROOK (G. L.). — *Nature*, **5**, April 1924.
8. ARSENIEVA et KOURTCHATOF. — *Journ. Phys. Russe*, **3** (1933), 149.
9. BALDWIN-WISEMAN et GRIFFITH (O. W.). — *Proc. Inst. Civ. Eng.*, **179**, 312.
10. BALDWIN-WISEMAN et GRIFFITH (O. W.). — *Tables annuelles des Constantes*, **1**, 671.
11. BAUMBACH et WAGNER. — *Zeits. phys. Ch.*, **24** (1934), 59.
12. BEIJERINCK. — *Neues Jahrb. für Min. Geol. u. Pal.*, Beil. Bd **11** (1898), 403.
13. BRAUN. — *Ann. der Physik*, **153** (1874), 556.
14. BURBANK. — *Terr. Magn.*, **10** (1905), 23.
15. CAHEN (L.) et CARVALLO (J.). — *Journ. Physique*, **6** (1924), 113.
16. CARVALLO (J.). — *Rev. Gén. Élect.*

17. CLARK (J. D.) et WILLIAMS (J. W.). — *Journ. Phys. Ch.*, **37** (1933), 119.
18. COSTE (J. H.). — *Proc. phys. Soc. London*, **40** (1928), 40.
19. CURIE (J.). — *Thèse*, Paris, 1888.
20. DECHÈNE (G.). — *C. R.*, **196** (1933), 1577.
21. DECHÈNE (G.). — *C. R.*, **200** (1935), 648.
22. EBERT. — *Geol. Rundschau*, **18** (1927), 398.
23. EVERSLED. — Voir : 53.
24. GARTENER et EQUATOWITCH. — *Ann. der Physik*, **10** (1931), 681.
25. GEOFFROY et CHARRIN. — *Études géologiques et prospection minière par les méthodes géophysiques*, Alger, 1932.
26. GNANN (W.). — *Zeits. Phys.*, **66** (1930), 436.
27. GUILLERD. — *Notions d'Hydrologie appliquée à l'hygiène*. Paris et Liège. Librairie polytechnique, Ch. Béranger, 1923.
28. GUINCHANT. — *C. R.*, **134** (1902), 1224.
29. GUNTHER-SCHULZE. — *Zeits. Elektroch.*, **26** (1920), 472.
30. HARTMAN, SULLIVAN et ALLEN. — *Journ. am. electrochem. Soc.*, **38** (1920), 279.
31. HEILAND (C. A.). — *Col. Sch. Mines Quart.*, **24**, 1 March. 1929.
32. HEILAND (C. A.) et DART WANTLAND. — *Col. Sch. Mines Quart.*, **26**, 3 Juli 1931.
33. HEINE. — *Metall. und Erz.*, **10** (1928), 238.
34. HLAUSCHEK. — *Zeits. prakt. Geol.*, **2** (1927).
35. JOFFÉ. — *Actualités scientifiques et industrielles*, Hermann, n° 87, 1934.
36. JOLLAND. — *Journ. Physique*, **6-10** (1929), 1628.
37. KEEN (B. A.). — *Proc. phys. Soc. London*, **40** (1928), 40.
38. KNOWLER (A. E.). — *Proc. phys. Soc. London*, **40** (1928), 37.
39. KÖNIGSBERGER. — *Bur. of Stand. Techn. Pub.*, **129** (1928).
40. KÖNIGSBERGER. — *Petroleum*, **22** (1926), 35.
41. KÖNIGSBERGER. — *Phys. Zeits.*, **8** (1907), 833.
42. KÖNIGSBERGER et REICHENHEIM. — *Zentralblatt für Min. Geol. u. Pal.*, **2** (1906), 20.
43. KÖNIGSBERGER et SCHILLING. — *Phys. Zeits.*, **9** (1908), 347.
44. LE BLANC et SACHSE. — *Ann. der Physik.*, **11** (1931), 727.
45. LEISTE (E.). — *Zeits. Phys.*, **62** (1930), 646.
46. LÉWY. — *Ann. der Physik*, **36** (1911), 125.
47. LÉWY. — *Zentralblatt für Min. Geol. u. Pal.*, **9** (1911), 573.
48. LÉWY. — *Tables annuelles des Constantes*, II, 646.
49. MAC COLLUM (B.) et LOGAN (K. H.). — *Bur. of Stand. Tech. Publ.*, **26**, 20 décembre 1915.

50. MAURAIN (Ch.). — Les Méthodes Géophysiques pour l'étude des couches superficielles du sol. *La Revue pétrolière*, Paris, 1929.
51. MAYR (G.). — *Nuov. Cim.*, 1927.
52. MEYER (H.). — *Ann. der Physik*, **19** (1883), 70.
53. MIKHAÏLOV. — *Electrichestvo*, (1928), 280.
54. MÖNCH (W.). — *Neues Jahrb. für Min. Geol. u. Pal.*, Beil Bd, **20** (1905), 365.
55. MURASHOV, BERENTGARTEN, ETCHEISTOVA (A.) et KUDIAKOVA. — *Com. Geol. Matériaux*, livre 76. Ser. de la Géophysique appliquée.
56. OKUBO (J.). — *Sc. Rep. Tohoku. Imp. Un.*, **12** (1924), 299.
57. ONSAGER. — *Trans. Faraday. Soc.*, **23** (1927), 341.
58. PHILIPPS, LANSING et COKE. — *Journ. Am. chem. Soc.*, **48** (1926), 112.
59. PHILIPPS et PARTRIDGE. — *Am. chem. Soc.*, **51** (1929), 1331.
60. RABINOWITCH et WOOD. — *Zeits. für Elektroch.*, **39** (1933), 562.
61. RASH et HINRICHSSEN. — *Zeits. für Elektroch.*, **14** (1908), 41.
62. REBOUL (G.). — *Journ. Physique*, **2** (1931), 86.
63. REBOUL (G.). — *Journ. Physique*, **4** (1932), 73.
64. REBOUL (G.), DECHÈNE (G.) et JACQUESSON (R.). — *Journ. Physique*, **8** (1927), 199.
65. REICH (H.). — Voir 1.
66. REICH (H.). — *Metall. u. Erz.*, **13** (1928).
67. REICH (H.). — *Jahrb. 1925 der preusz. Geol. Landesanstalt.*, Berlin, 1926.
68. ROONEY. — *Terr. Magn.*, **32** (1927), 98.
69. ROONEY et GISH. — *Phys. Rev.*, **25** (1925), 254.
70. ROTHÉ. — *Les méthodes de prospection géophysique*, Paris, Gauthier-Villars, 1930.
71. SALESSKY. — *Zeits. Phys.*, **52** (1928), 695.
72. SCHLUMBERGER (C.). — *Étude sur la prospection électrique du sous-sol*. Gauthier-Villars, Paris, 1920.
73. SCHLUMBERGER (C.). — *C. R.*, **170** (1920), 519.
74. SCHLUMBERGER (C. et M.). — *Annales des Mines*, **189** (1930), 97.
75. SCHUMANN (W. O.). — *Zeits. Phys.*, **79** (1932), 532.
76. SEELIGER. — *Phys. Zeits.*, **29** (1928), 489.
77. STANSFIELD, MAC LEOD et MAHON. — *Journ. am. Electroch. Soc.*, **38** (1920), 574.
78. STEINTZ. — *Jahrb. der Radioaktivität u. Elektronik*, **10** (1913), 221.
79. SUITZ (C. G.) et DUNLAP (M. E.). — *Gén. élec. Rev.*, **34**, décembre 1931, 706.
80. SUNDBERG (K.), LUNDBERG (H.) et EKLUND (J.). — *Sver. Geol. Unders. Arsbok*, **17** (1923), Sér. C, n° 327.

81. TEGETMEYER. — *Wied. ann.*, **41** (1890), 18.  
82. TEGETMEYER et WARBURG. — *Wied. ann.*, **35** (1888), 445.  
83. TUBANDT et REINHOLD. — *Zeits. phys. Chem.*, **24** (1934), 22.  
84. VAN AUBEL. — *C. R.*, **135** (1902), 734.  
85. WATERMAN (A. T.). — *Phys. Rev.* **21** (1923), 388.  
86. WEIGEL (O.). — *Neues. Jahrb. für Min. Geol. u. Pal.*, **21** (1905), 325.  
87. WEIGEL (O.). — *Zeits. für Min.*, **58** (1923), 183.  
88. WILSON (A. H.). — *Actualités scientifiques et industrielles*, Hermann, n<sup>o</sup> 82, 1933.  
89. WILSON (E.) et HERROUN. — *Proc. Roy. Soc. London*, **105** (1924), 334.  
90. ZENNECK. — *Ann. der Physik.*, **23** (1907), 859.
-

# DEUXIÈME THÈSE

---

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

**Rayons cosmiques.**

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 19 juin 1935.

*Le Doyen de la Faculté des Sciences,*

CH. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

*Le Recteur de l'Académie de Paris,*

S. CHARLÉTY.





